



“Etude et modélisation des performances de systèmes découpeurs d’images pour l’astronomie. Application à l’instrumentation du JWST et du VLT”

Florence Laurent

► To cite this version:

Florence Laurent. “Etude et modélisation des performances de systèmes découpeurs d’images pour l’astronomie. Application à l’instrumentation du JWST et du VLT”. Autre. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2006. Français. NNT : . tel-00079224

HAL Id: tel-00079224

<https://theses.hal.science/tel-00079224>

Submitted on 9 Jun 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ANNEE 2006

UNIVERSITE JEAN MONNET – SAINT ETIENNE
CENTRE DE RECHERCHE ASTRONOMIQUE DE LYON
CYBERNETIX SA – MARSEILLE

THESE

PRESENTEE POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : OPTIQUE OPTOELECTRONIQUE ET MICROONDES

INSTRUMENTATION OPTIQUE

PRESENTEE PAR

FLORENCE LAURENT

**“ETUDE ET MODELISATION DES PERFORMANCES DE
SYSTEMES DECOUPEURS D’IMAGES POUR L’ASTRONOMIE.
APPLICATION A L’INSTRUMENTATION DU JWST ET DU VLT”**

THESE SOUTENUE À L’OBSERVATOIRE DE LYON LE 10 AVRIL 2006 À 15H

COMPOSITION DU JURY

M. GERALD BRUN
M. JEAN-GABRIEL CUBY
M. NIRANJAN THATTE
M. ROLAND BACON
M. FRANCOIS HENAULT
M. ERIC PRIETO

PRESIDENT DE JURY
RAPPORTEUR
RAPPORTEUR
DIRECTEUR DE THESE
EXAMINATEUR
EXAMINATEUR

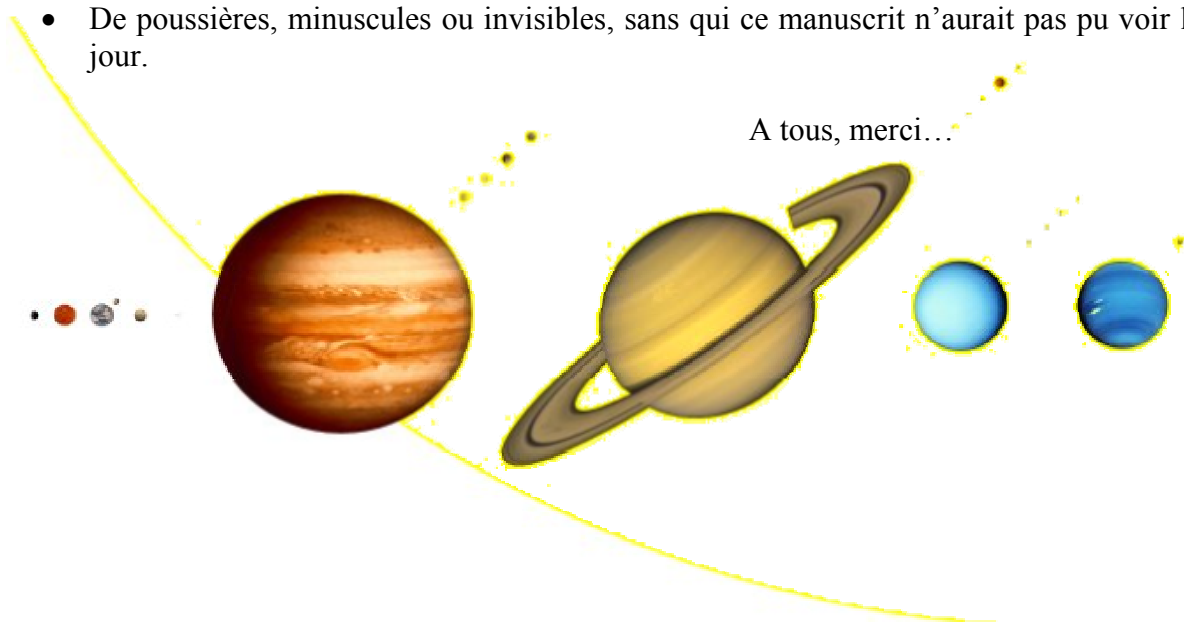
REMERCIEMENTS

Le défi principal concernant les remerciements après une thèse consiste à n'oublier personne. Afin d'éviter cet écueil, je tiens à remercier toutes les personnes, qui de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce document.

En premier lieu, je tiens à remercier Jean-Gabriel Cuby et Niranjana Thatte pour avoir accepté la tâche de rapporteur. Leur encouragement et leur soutien sont autant de sources de motivation pour l'avenir. J'adresse mes remerciements aux membres du Jury. Un grand merci à Gérald Brun, Roland Bacon, François Hénault et Eric Prieto, je sais leur temps précieux.

En particulier, si les trois années et quelques mois qu'a duré ma thèse se sont déroulés dans d'excellentes conditions, c'est le fait de plusieurs personnes auxquelles je souhaite ici adresser mes sincères remerciements pour qu'elles sachent, si ce n'est pas déjà le cas, tout ce que je leur dois. En effet, le monde des personnes auxquelles j'adresse mes remerciements, est semblable à notre Galaxie, qui est composé :

- D'un soleil, imposant par son savoir, son charisme et sa rigueur. Je le remercie pour sa confiance et ses encouragements ; pour m'avoir permis de présenter mes travaux lors de nombreux congrès ; pour ses critiques constructives sur tous les aspects de mon travail aussi bien l'écriture que les réflexions scientifiques.
- De planètes plus ou moins proches, qui gravitent autour d'une même ambition – La réussite d'un projet. Je remercie ces personnes qui sont capables de faire naître et grandir de grands et beaux projets et de créer une réelle motivation au sein de ceux-ci. Je remercie également les personnes qui font avancer quotidiennement les projets comme les services instrumentaux (optique, mécanique, informatique et électronique).
- De satellites, naturels ou artificiels, qui constituent un support technologique et de savoir faire, créant un réseau de compétences entre laboratoires (LAM, LAOG, LMA), universités (Lyon 1, Jean Monnet et Durham) et industriels (Cybernétix SA).
- D'étoiles plus ou moins brillantes, qui alimentent multiples discussions scientifiques, administratives ou personnelles, apportant de réelles bouffées d'oxygène. Je remercie ici ma famille et notamment mon époux Denis et notre fils Léo-Paul.
- D'entités étranges, futiles, vivaces et captivantes, indispensables au bon déroulement de cette thèse,
- De poussières, minuscules ou invisibles, sans qui ce manuscrit n'aurait pas pu voir le jour.



RESUME

“Etude et modélisation des performances de systèmes découpeurs d’images pour l’astronomie. Application à l’instrumentation du JWST et du VLT”

Les systèmes découpeurs d’images sont un nouveau type de spectrographes intégraux de champ pour l’instrumentation astronomique. Ce mémoire de thèse présente l’étude et la modélisation des performances de ces systèmes, basés sur un design optique comprenant un miroir découpeur. Ce dernier est constitué d’un empilement de slices, dont chaque surface active est sphérique et tiltée. Pour les instruments du JWST et du VLT, on a étudié deux technologies de fabrication et d’assemblage du miroir découpeur. La première, conçue en collaboration avec Cybernetix, présente un assemblage de slices en Zérodur maintenu par adhérence moléculaire. La deuxième, repose sur la technologie d’usinage diamant sur des métaux, en une pièce monolithique ou segmentée. Trois prototypes représentatifs de chaque technologie ont été testés sur banc optique à l’Observatoire de Lyon – rugosité, BRDF, profil de forme, alignement, grandissement du système, qualité image – et comparés aux spécifications de haut niveau. Une conclusion comparative des résultats obtenus est présentée afin d’orienter la meilleure technologie de découpeur d’images aux projets instrumentaux, qu’il s’agisse d’instruments mono ou multi-voies, au sol ou dans l’espace.

Mots clés : Astronomie, Instrumentation, Optique, Spectroscopie intégrale de champ, Systèmes découpeurs d’images, JWST, VLT

ABSTRACT

“Study and modelization on image slicer performance for astronomy. Application to the instrumentation of JWST and VLT”

Image slicers systems are a new type of integral field spectrographs for astronomical instrumentation. This dissertation presents the study and modelization of the performance of such systems based on an optical design including a slicing mirror. The latter consists of a stacking of slices with spherical and tilted active optical surfaces. In view of instrumentation of JWST and VLT, this work describes optical design, manufacturing, assembling, component test results (shape, roughness, BRDF) and overall system performance (image quality, alignment) of two alternative technologies for image slicers. Proposed by Cybernetix, the first one uses individual optical components made of Zerodur, polished by classical method and assembled together by molecular adhesion. The second one involves monolithic or segmented optical elements made of metal and state-of-the-art diamond-turning machines. Then, we conclude on a comparison between these two different technologies, giving the most suitable solutions for astronomical instruments, either ground or spaceborne, and mono or multi channels.

Key words : Astronomy, Instrumentation, Optics, Integral field spectroscopy, Image slicers systems, JWST, VLT

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 | 5 |
| LA SPECTROSCOPIE INTEGRALE DE CHAMP | 5 |
| 1 Introduction | 7 |
| 2 L'instrumentation en astronomie | 7 |
| 2.1 Collecter le signal | 7 |
| 2.2 Mettre en forme le signal | 9 |
| 2.3 Détecter le signal | 10 |
| 2.4 Analyser et traiter le signal | 11 |
| 3 La spectroscopie | 12 |
| 3.1 La spectroscopie à fente longue | 13 |
| 3.2 La spectroscopie multi-objets | 13 |
| 3.2.1 Spectrographe à masques | 14 |
| 3.2.2 Spectrographe à éléments mobiles | 14 |
| 3.2.3 Spectrographe à matrice de micro-miroirs ou micro-obturbateurs | 14 |
| 3.3 La spectroscopie intégrale de champ | 15 |
| 3.3.1 Concept à base de trames de micro-lentilles | 15 |
| 3.3.2 Concept à base de micro-lentilles associé avec des fibres optiques | 16 |
| 3.3.3 Concept à découpeurs d'images | 16 |
| 3.3.3.1 Historique | 16 |
| 3.3.3.2 Principe d'un découpeur d'images | 17 |
| 3.3.3.3 Développements actuels et futurs | 18 |
| 4 Conclusion | 19 |
| CHAPITRE 2 | 23 |
| MODELISATION OPTIQUE POUR UN DECOUPEUR D'IMAGES | 23 |
| 1 Introduction | 25 |
| 2 Caractérisation d'un découpeur d'images | 25 |
| 2.1 Principe d'un découpeur d'images | 25 |
| 2.2 Caractéristiques des éléments individuels | 27 |
| 2.2.1 Le miroir découpeur | 27 |
| 2.2.2 Les éléments pupille et fente | 27 |
| 2.3 Optimisation d'un découpeur d'images | 28 |
| 2.4 Méthodologie de tests | 28 |
| 3 Calcul des zones de blocages sur un découpeur d'images | 28 |
| 4 Simulation en tenant compte de la diffraction, des aberrations géométriques et des états de surface | 29 |
| 4.1 Optique de Fourier | 30 |
| 4.1.1 Principe de Huygens-Fresnel | 30 |
| 4.1.2 Facteur de transmission | 31 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 4.1.3 | Diffraction de Fresnel | 31 |
| 4.1.4 | Diffraction de Fraunhofer | 32 |
| 4.1.5 | Eclairage cohérent et incohérent | 32 |
| 4.1.6 | Formation des images : Action d'une lentille sur une onde optique | 33 |
| 4.1.7 | Action de la diffraction sur la formation des images | 33 |
| 4.1.8 | Aberrations géométriques et état de surface | 34 |
| 4.2 | Théorie de l'échantillonnage | 34 |
| 4.2.1 | La transformée de Fourier discrète | 34 |
| 4.2.2 | Critère de Shannon | 35 |
| 4.2.3 | Méthode du « zero padding » | 36 |
| 4.2.4 | La transformée de Fourier rapide | 36 |
| 4.2.5 | Applications de la théorie d'échantillonnage pour le calcul d'une transformée de Fourier | 36 |
| 4.3 | Principe de fonctionnement de la simulation | 37 |
| 4.3.1 | Simulation dans le plan « champ » | 38 |
| 4.3.2 | Simulation dans le plan pupillaire | 39 |
| 4.4 | Résultats de la simulation | 41 |
| 4.4.1 | Résultats pour le prototype découpeurs d'images en zérodur | 41 |
| 4.4.2 | Résultats pour les prototypes découpeurs d'images métalliques | 43 |
| 5 | Conclusion | 45 |
| | | |
| CHAPITRE 3 | | 47 |
| | | |
| TESTS DE PERFORMANCES DE DEUX DECOUPEURS D'IMAGES APPLICATION AU JWST | | 47 |
| | | |
| 1 | Introduction | 49 |
| | | |
| 2 | Design Optique | 50 |
| 2.1 | Integral Field Unit (IFU) de NIRSpec | 50 |
| 2.1.1 | Présentation du système découpeur d'images de l'IFU | 51 |
| 2.1.2 | Caractéristiques du prototype nommé « Prototype CRAL » | 51 |
| 2.2 | Integral Field Spectrograph (IFS) de NIRSpec | 52 |
| 2.2.1 | Présentation du système découpeur d'images de l'IFS | 52 |
| 2.2.2 | Caractéristiques du prototype nommé « Prototype ESA» | 54 |
| | | |
| 3 | Fabrication | 55 |
| 3.1 | Techniques de fabrication | 56 |
| 3.2 | Fabrication et contrôles du prototype CRAL | 57 |
| 3.2.1 | Processus de fabrication | 57 |
| 3.2.2 | Processus de contrôle | 58 |
| 3.3 | Fabrication et contrôles du prototype ESA | 59 |
| 3.4 | Conclusion | 60 |
| | | |
| 4 | Assemblage | 61 |
| 4.1 | Technique d'assemblage | 61 |
| 4.2 | Assemblage et contrôle du prototype CRAL | 62 |
| 4.2.1 | Processus d'assemblage | 62 |
| 4.2.1.1 | Miroir découpeur | 62 |
| 4.2.1.2 | Miroirs pupille | 63 |
| 4.2.2 | Processus de contrôle | 64 |
| 4.2.2.1 | Miroir découpeur du prototype CRAL | 64 |
| 4.2.2.2 | Miroirs pupille du prototype CRAL | 65 |
| 4.3 | Assemblage et contrôle du prototype ESA | 66 |
| 4.3.1 | Processus d'assemblage | 66 |
| 4.3.1.1 | Miroir découpeur | 66 |
| 4.3.1.2 | Miroirs pupille et fente | 67 |
| 4.3.2 | Processus de contrôle de l'assemblage | 67 |

| | | |
|--|---|------------|
| 4.3.2.1 | Miroir découpeur du prototype ESA | 67 |
| 4.3.2.2 | Miroirs pupille et fente du prototype ESA | 68 |
| 4.4 | Conclusion | 69 |
| 5 | Liste des tests | 69 |
| 6 | Résultats et Comparaisons | 72 |
| 6.1 | Prototype CRAL | 72 |
| 6.1.1 | Plan des pupilles intermédiaires | 72 |
| 6.1.2 | Alignement des mini fentes | 73 |
| 6.1.3 | Qualité image du prototype CRAL | 75 |
| 6.1.4 | Conclusion | 77 |
| 6.2 | Prototype ESA | 77 |
| 6.2.1 | Intégration du prototype | 77 |
| 6.2.2 | Plan des pupilles intermédiaires | 77 |
| 6.2.3 | Plan de la pseudo-fente | 78 |
| 6.2.3.1 | Alignement et caractéristiques | 78 |
| 6.2.3.2 | Qualité image | 79 |
| 6.2.4 | Plan de la pupille de sortie | 80 |
| 6.2.5 | Tests en environnement cryogénique du prototype ESA | 81 |
| 6.2.5.1 | Mise en place des tests | 81 |
| 6.2.5.2 | Tests à 30K | 83 |
| 6.2.6 | Conclusion | 83 |
| 7 | Conclusion | 84 |
| CHAPITRE 4 | | 87 |
| TESTS DE PERFORMANCES D'UN DECOUPEUR D'IMAGES EN TECHNOLOGIE « VERRE ». APPLICATION À L'INSTRUMENT MUSE POUR LE VLT | | 87 |
| 1 | Introduction | 89 |
| 2 | Design Optique | 92 |
| 2.1 | Présentation du système découpeur d'images de Phase A | 92 |
| 2.2 | Caractéristiques du prototype | 95 |
| 3 | Fabrication et assemblage | 96 |
| 3.1 | Miroir découpeur du prototype MUSE | 96 |
| 3.2 | Ensemble L1 – PLR – FLR – L2 du prototype MUSE | 97 |
| 4 | Liste des tests | 98 |
| 5 | Résultats et comparaisons | 101 |
| 5.1 | Mesures de rugosité et BRDF | 101 |
| 5.2 | Plan des pupilles intermédiaires | 101 |
| 5.3 | Plan de la pseudo-fente | 103 |
| 5.3.1 | Alignement et caractéristiques de la pseudo fente | 104 |
| 5.3.2 | Tests sur la qualité image du système découpeurs d'images | 106 |
| 5.4 | Plan de la pupille de sortie | 107 |
| 6 | Conclusion | 108 |
| CHAPITRE 5 | | 111 |
| TESTS DE PERFORMANCES D'UN DECOUPEUR D'IMAGES EN TECHNOLOGIE « METAL ». APPLICATION À L'INSTRUMENT MUSE POUR LE VLT | | 111 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Introduction | 113 |
| 2 | Design Optique | 113 |
| 2.1 | Présentation du système découpeur d'images de la Phase de Design Préliminaire | 113 |
| 2.2 | Caractéristiques du prototype | 116 |
| 3 | Fabrication | 116 |
| 3.1 | Techniques de fabrication : Usinage diamant | 117 |
| 3.1.1 | Tournage (Diamond turning) | 117 |
| 3.1.2 | Fraisage (Fly cutting) | 117 |
| 3.2 | Fabrication et contrôles du prototype de la société B | 118 |
| 3.3 | Fabrication et contrôles du prototype de la société C | 119 |
| 3.4 | Fabrication et contrôles du prototype de la société D | 121 |
| 3.5 | Conclusion | 123 |
| 4 | Assemblage | 123 |
| 4.1 | Assemblage et contrôles du prototype de la société B | 123 |
| 4.2 | Assemblage et contrôles du prototype de la société C | 124 |
| 4.3 | Assemblage et contrôles du prototype de la société D | 125 |
| 4.4 | Conclusion | 126 |
| 5 | Liste des tests | 126 |
| 6 | Résultats et comparaisons | 128 |
| 6.1 | Prototypes des sociétés B et C | 128 |
| 6.2 | Prototype de la société D | 129 |
| 6.2.1 | Plan des pupilles intermédiaires | 129 |
| 6.2.2 | Plan de la pseudo-fente | 130 |
| 6.2.2.1 | Alignement et caractéristiques de la pseudo fente | 130 |
| 6.2.2.2 | Qualité image | 132 |
| 6.2.3 | Plan de la pupille de sortie | 133 |
| 7 | Conclusion | 133 |
| | CHAPITRE 6 | 135 |
| | COMPARAISON DES TECHNOLOGIES « VERRE » ET « METAL » | 135 |
| 1 | Introduction | 137 |
| 2 | Mise en parallèle des deux technologies | 137 |
| 2.1 | Critères d'évaluation concernant la fabrication et l'assemblage | 137 |
| 2.2 | Critères d'évaluation concernant les performances optiques | 138 |
| 2.3 | Critères d'évaluation concernant le management | 138 |
| 2.4 | Résumé des critères d'évaluation | 138 |
| 3 | Adaptabilité de chaque système et technologie aux différentes applications | 140 |
| 4 | Conclusion | 141 |
| | CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 143 |
| | ANNEXES | 149 |

TABLE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1- 1 : Divers montages optiques de télescopes | 8 |
| Figure 1- 2 : Principe d'un spectrographe classique [3]..... | 12 |
| Figure 1- 3 : Organigramme des différents spectrographes appliqués pour l'astronomie | 13 |
| Figure 1- 4 : Micro-shutter (Goddard Space Flight Centre)..... | 14 |
| Figure 1- 5 : A gauche : Principe optique du spectrographe TIGER à base de micro-lentilles. A droite : Trame de micro-lentilles de l'instrument SNIFS..... | 15 |
| Figure 1- 6 : Le découpeur d'images de Bowen-Walraven | 17 |
| Figure 1- 7 : Découpeur d'images de Weitzel..... | 17 |
| Figure 1- 8 : Concept du découpeur d'images proposé par Content, 1997 | 17 |
| | |
| Figure 2- 1 : Principe du découpeur d'images. A gauche : Conjugaison « pupillaire ». A droite : Conjugaison « champ »..... | 26 |
| Figure 2- 2 : Caractéristiques optiques d'une slice. De gauche à droite : Visualisation de la surface active, Tilt suivant la direction x, Tilt suivant la direction y..... | 27 |
| Figure 2- 3 : Définition des surfaces bloquantes et actives..... | 29 |
| Figure 2- 4 : Coupe suivant l'axe x de la PSF d'un système découpeur d'images dont l'élément pupille est une fonction périodique d'amplitude PTV de 20 nm avec une période de 20 μm . A gauche : Résultats donnés par Zemax. A droite : Résultats donnés par la simulation IDL. | 30 |
| Figure 2- 5 : Schéma illustrant les notations utilisées pour le principe de Huygens-Fresnel .. | 31 |
| Figure 2- 6 : Schéma illustrant les notations utilisées pour l'action de la diffraction sur la formation des images | 33 |
| Figure 2- 7 : Schéma illustrant les notations pour la théorie d'échantillonnage | 35 |
| Figure 2- 8 : Schéma illustrant les notations pour l'échantillonnage afin de déterminer l'échelle dans le plan image. | 37 |
| Figure 2- 9 : Principe de modélisation dans le plan du champ | 38 |
| Figure 2- 10 : Principe de modélisation dans le plan pupillaire..... | 40 |
| Figure 2- 11 : Image de la pupille du télescope dans la plan des pupilles intermédiaires. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y | 42 |
| Figure 2- 12 : Image de la slice dans le plan de la pseudo fente. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y..... | 42 |
| Figure 2- 13 : PSF dans le plan de la pseudo fente. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y..... | 42 |
| Figure 2- 14 : Pupille de sortie du système découpeur d'images. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y..... | 43 |
| Figure 2- 15 : Image de la slice dans le plan de la pseudo fente. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y..... | 45 |
| Figure 2- 16 : PSF dans le plan de la pseudo fente : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y | 45 |
| | |
| Figure 3- 1 : Le futur télescope spatial JWST..... | 49 |
| Figure 3- 2 : Diagramme fonctionnel de l'IFU de NIRSpec..... | 51 |
| Figure 3- 3 : Design optique de l'IFU de NIRSpec..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figure 3- 4 : Planning du prototype CRAL..... | 52 |
| Figure 3- 5 : Design optique de l'instrument IFMOS | 53 |
| Figure 3- 6 : Planning du prototype ESA | 55 |
| Figure 3- 7 : CTE pour différents verres [13] | 56 |
| Figure 3- 8 : Processus de fabrication des slices du prototype CRAL..... | 57 |
| Figure 3- 9 : Une slice du prototype CRAL | 58 |
| Figure 3- 10 : Un miroir pupille du prototype CRAL | 58 |
| Figure 3- 11 : Visualisation des éclats sur le bord des slices | 59 |
| Figure 3- 12 : Processus de fabrication des slices du prototype ESA [17]. | 60 |
| Figure 3- 13 : Processus d'assemblage du miroir découpeur du prototype CRAL..... | 63 |
| Figure 3- 14 : Processus d'assemblage des miroirs pupille | 64 |
| Figure 3- 15 : A gauche : Profil de la face active du miroir découpeur. Au milieu : Profil de la face arrière. A droite : Visualisation de la désadhérence des slices. | 65 |
| Figure 3- 16 : Profilomètre de la barrette de miroirs pupille | 65 |
| Figure 3- 17 : Procédé d'assemblage du prototype ESA [23]..... | 66 |
| Figure 3- 18 : Processus d'assemblage des miroirs pupille et fente du prototype ESA..... | 67 |
| Figure 3- 19 : Procédé d'assemblage des nouvelles barrettes de miroirs pupille et fente du prototype ESA..... | 69 |
| Figure 3- 20 : Ligne des pupilles intermédiaires..... | 72 |
| Figure 3- 21 : Erreurs angulaires sur les slices..... | 73 |
| Figure 3- 22 : Coupe d'une pupille intermédiaire. A gauche : Suivant l'axe x. A droite : Suivant l'axe y..... | 73 |
| Figure 3- 23 : La pseudo fente composée de 10 mini fentes..... | 74 |
| Figure 3- 24 : Angles des miroirs pupille en minutes d'arc | 74 |
| Figure 3- 25 : Coupe d'une fente. A gauche : Suivant l'axe x. A droite : Suivant l'axe y. | 75 |
| Figure 3- 26 : A gauche : Répartition des PSF acquises sur le miroir découpeur. Au milieu : Acquisition d'une PSF. A droite : PSF en 3D..... | 75 |
| Figure 3- 27 : Courbes d'énergie encerclée pour la PSF du prototype CRAL..... | 76 |
| Figure 3- 28 : Acquisition d'une PSF coupée par deux slices. A gauche : Images de la PSF coupée. A droite : Courbes d'énergie encerclée de la PSF reconstruite. | 77 |
| Figure 3- 29 : Illustration des insertions de cales entre la structure mécanique et les optiques | 77 |
| Figure 3- 30 : Images de la pupille du télescope centrées sur leurs miroirs pupille | 78 |
| Figure 3- 31 : Cinq mini fentes sur leurs miroirs fente | 78 |
| Figure 3- 32 : Fente individuelle (n°22)..... | 79 |
| Figure 3- 33 : A gauche : PSF mesurée. A droite : Comparaison entre une PSF mesurée et théorique calculées avec Zemax..... | 79 |
| Figure 3- 34 : Evolution de la PSF au voisinage du plan image | 80 |
| Figure 3- 35 : Comparaison des courbes d'énergie encerclée pour une PSF mesurée et théorique..... | 80 |
| Figure 3- 36 : Pupille de sortie de la configuration n°21 pour trois points du champ | 81 |
| Figure 3- 37 : En haut à gauche : Prototype ESA installé dans l'enceinte cryogénique avec les tresses thermiques, les capteurs de température et les bipodes en G10. En haut à droite : Prototype installé sous le caisson à vide avec le module d'illumination et de détection. En bas à gauche : Prototype sous le bouclier thermique recouvert de MLI. En bas à droite : Courbe de température des éléments optiques lors de la descente en froid..... | 82 |
| Figure 3- 38 : Mesure de PSF. De gauche à droite : Avant la descente en froid, à 30K, après la remontée à chaud..... | 83 |
| Figure 4- 1 : Les quatre télescopes du VLT, au Chili | 89 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4- 2 : Bloc diagramme de l'instrument MUSE | 91 |
| Figure 4- 3 : Design optique du système découpeur d'images de l'instrument MUSE | 92 |
| Figure 4- 4 : Caractéristiques du découpeur d'images MUSE | 93 |
| Figure 4- 5 : Illustration de l'implantation de la lentille d'entrée L1 | 93 |
| Figure 4- 6 : Formes géométriques d'une lentille pupille et fente | 94 |
| Figure 4- 7 : Illustration de l'effet de la rotation autour de l'axe z sur l'écart entre les mini fentes | 94 |
| Figure 4- 8 : Planning du prototype MUSE | 95 |
| Figure 4- 9 : Processus de fabrication des slices MUSE. En haut à gauche : Polissage d'un bloc de Zérodur. A droite : Désépaississement d'une slice. En bas à gauche : Une slice MUSE | 96 |
| Figure 4- 10 : Processus d'assemblage du prototype MUSE. A gauche : Trièdre optique. A droite : Miroir découpeur MUSE | 97 |
| Figure 4- 11 : Procédé d'assemblage des PLR et FLR | 97 |
| Figure 4- 12 : L1 et L2 et leurs structures mécanique | 98 |
| Figure 4- 13 : Plan schématique du banc de tests du prototype MUSE | 99 |
| Figure 4- 14 : A gauche : Mesure de rugosité sur le slice n°19. A gauche : Mesure de BRDF au centre des slices n°19 et 20 | 101 |
| Figure 4- 15 : Images brutes des images de la pupille du télescope | 101 |
| Figure 4- 16 : Ecarts aux valeurs théoriques des positions absolues des images de la pupille du télescope suivant l'axe x | 102 |
| Figure 4- 17 : A gauche : Interférogramme de la face arrière du miroir découpeur. A droite : Interférogramme de la face latérale du miroir découpeur | 103 |
| Figure 4- 18 : Ecarts aux valeurs théoriques des positions absolues des images de la pupille du télescope suivant l'axe y | 103 |
| Figure 4- 19 : 12 mini fentes constituant la pseudo fente | 104 |
| Figure 4- 20 : Distance entre chaque mini fente aux trois longueurs d'onde de mesures | 104 |
| Figure 4- 21 : A gauche : Illustration de la diffusion du doublet L2 par un laser à 633 nm. A droite : Mini fente à trois longueurs d'onde au meilleur foyer | 105 |
| Figure 4- 22 : Mini fente correspondante à la slice n°2 mesurée à 577 nm | 105 |
| Figure 4- 23 : Longueur en mm des mini fentes | 106 |
| Figure 4- 24 : Largeur en mm des mini fentes | 106 |
| Figure 4- 25 : De gauche à droite : PSF à 577 nm sur la slice n°21, PSF à 577 nm sur la slice n°37 et PSF à 823 nm sur la slice n°37 | 107 |
| Figure 4- 26 : Energie dans un rectangle de toutes les PSF mesurées en laboratoire sur la surface utile du miroir découpeur | 107 |
| Figure 4- 27 : A gauche : Pupille de sortie à 577 nm. A droite : Pupille de sortie à 823 nm | 108 |
| Figure 4- 28 : Nombre d'ouverture de sortie du système découpeur d'images MUSE suivant les axes x et y | 108 |
| Figure 4- 29 : Trois prototypes testés au CRAL à échelle réelle. De gauche à droite : Prototype CRAL, prototype ESA, prototype MUSE | 109 |

| | |
|---|-----|
| Figure 5- 1 : Système découpeur d'images de MUSE. A gauche : Dessin mécanique global avec cinq blocs constituant IDA et FMA. A droite : Dessin mécanique d'un bloc d'IDA et FMA | 115 |
| Figure 5- 2 : Design optique du RIS. En haut : 12 miroirs composant chaque IDA et FMA. En bas : Visualisation du design optique pour un seul jeu de miroirs | 115 |
| Figure 5- 3 : Représentation des éléments optiques représentatifs du prototype MUSE | 116 |
| Figure 5- 4 : Planning des activités sur les prototypes MUSE | 116 |

| | |
|---|---------|
| Figure 5- 5 : Tour à commande numérique..... | 117 |
| Figure 5- 6 : Fraiseuse à commande numérique | 118 |
| Figure 5- 7 : Illustration des outils utilisés lors de la fabrication de l'IDA et du FMA en fly cutting..... | 118 |
| Figure 5- 8 : A gauche : Rugosigramme d'un FMA réalisé par LMA. A droite : Explication de la structure en forme d'alvéoles | 119 |
| Figure 5- 9 : Processus de fabrication des slices composant l'IDA | 120 |
| Figure 5- 10 : Processus de fabrication des miroirs du FMA..... | 120 |
| Figure 5- 11 : Rugosité du prototype de la société C. A gauche : Rugosigramme de la slice n°5. A droite : Rugosigramme du miroir FMA n°1 | 121 |
| Figure 5- 12 : Rugosité du prototype de la société D. A gauche : Rugosigramme de la slice n°6. A droite : Rugosigramme du miroir FMA n°1 | 121 |
| Figure 5- 13 : Mesures de BRDF. A gauche : Sur deux slices. A droite : Sur deux miroirs de FMA | 122 |
| Figure 5- 14 : Profil de forme. A gauche : Vue 2D. Au milieu : Coupe suivant l'axe x. A droite : Coupe suivant l'axe y. | 122 |
| Figure 5- 15 : Prototype de la société B. De gauche à droite : Dessin mécanique de l'assemblage de l'IDA, vues de l'IDA et du FMA | 124 |
| Figure 5- 16 : Prototype de la société C. De gauche à droite : l'IDA, une visualisation des slices non jointives et le FMA..... | 124 |
| Figure 5- 17 : Prototype de la société D. De gauche à droite : l'IDA, une visualisation des copeaux sur les slices et le FMA | 125 |
| Figure 5- 18 : Erreurs angulaires autour de l'axe y des slices de IDA pour les trois prototypes | 125 |
| Figure 5- 19 : Superposition des plans des pupilles intermédiaires mesurées au laboratoire et données par Zemax. A gauche : Prototype de la société B. A droite : Prototype de la société C | 128 |
| Figure 5- 20 : Images brutes en fausses couleurs du plan des pupilles intermédiaires | 129 |
| Figure 5- 21 : Superposition des plans des pupilles intermédiaires mesurées au laboratoire et données par Zemax pour le prototype de la société D | 129 |
| Figure 5- 22 : Coupe de la pupille intermédiaire n°5. A gauche : suivant l'axe x. A droite : suivant l'axe y | 130 |
| Figure 5- 23 : Image brute dans le plan de la pseudo fente..... | 131 |
| Figure 5- 24 : Positionnement des centroïdes de chaque mini fente dans le plan de la pseudo fente..... | 131 |
| Figure 5- 25 : Visualisation des fentes. A gauche : Découpeur d'images reconstitué. A droite : Slice n°1 et 9 | 132 |
| Figure 5- 26 : PSF du RIS. A gauche : PSF brute à 577 nm. A droite : Coupe suivant les axes x et y | 133 |
| Figure 1 : Exemple de dessins mécaniques de l'instrument MOMFIS pour OWL à 30 IFUs | 147 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1- 1 : Projets instrumentaux à base de découpeurs d'images | 19 |
| Tableau 2- 1 : Paramètres d'entrées pour la modélisation du prototype « ESA » | 41 |
| Tableau 2- 2 : Paramètres d'entrées pour la modélisation du prototype « MUSE » en tournage diamant | 44 |
| Tableau 3- 1 : Caractéristiques géométriques et optiques des éléments composant l'IFU et l'IFS de NIRSpec | 53 |
| Tableau 3- 2 : Spécifications d'entrée/sortie de l'IFU et de l'IFS de NIRSpec..... | 54 |
| Tableau 3- 3 : Liste des tests sur banc optique appliquées aux prototypes CRAL et ESA..... | 71 |
| Tableau 4- 1 : Spécifications d'entrée/sortie du système découpeur d'images de MUSE..... | 95 |
| Tableau 4- 2 : Liste des tests sur banc optique du prototype MUSE | 100 |
| Tableau 5- 1 : Spécifications d'entrée/sortie du RIS..... | 115 |
| Tableau 5- 2 : Tableau résumant les mesures de lumière diffusée, de rugosité et de forme, effectuées par le LMA, des IDA et FMA des trois fournisseurs..... | 122 |
| Tableau 5- 3 : Résumé des caractéristiques de fabrication et d'assemblage des trois prototypes | 123 |
| Tableau 5- 4 : Liste des tests sur banc optique des prototypes métalliques MUSE | 127 |
| Tableau 6- 1 : Comparaison entre la technologie verre et métallique..... | 139 |
| Tableau 1 : Caractéristiques des systèmes découpeurs d'images en verre testés au CRAL .. | 146 |

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'astronomie s'intéresse au cosmos et aux objets qui le composent. En dehors de l'environnement immédiat de la terre et de notre système solaire, qui sont « visitables » par des sondes spatiales, l'astronomie ne possède que la lumière émise par les astres. Dans un premier temps, il faut la capter puis l'analyser. Depuis 400 ans, les techniques d'observation astronomique ont fortement évolué, entraînant une progression spectaculaire de la science qui en découle. Parmi les différentes techniques utilisées pour analyser la lumière d'un corps céleste, une nouvelle génération de spectrographes dits intégraux de champ permet de stocker une information tridimensionnelle sur un détecteur bidimensionnel (deux coordonnées spatiales et une coordonnée spectrale). L'Observatoire de Lyon est pionnier sur ce type d'instruments. Dans les années 1990, il a conçu TIGER, premier spectrographe dont l'échantillonneur spatial est une trame de micro-lentilles et ses successeurs OASIS, SAURON et SNIFS. Fort des expériences précédentes, l'Observatoire de Lyon développe depuis 2001 une activité de Recherche et Développement (R&D) sur un nouveau concept de spectrographes intégraux de champ basés sur des découpeurs d'images.

Ce travail de thèse, débuté le 1 décembre 2002, a pour but de poursuivre cette activité de R&D en démontrant la faisabilité des découpeurs d'images pour l'astronomie, notamment pour une instrumentation du James Webb Space Telescope (JWST) et du Very Large Telescope (VLT). Cette thèse est le fruit d'une collaboration sur une bourse CIFRE entre l'Observatoire de Lyon, la société Cybernétix SA (Marseille, France) et l'Université Jean Monnet de Saint Etienne.

L'originalité de ce travail vient du fait qu'en 2001, aucun système découpeur d'images basé sur une technologie « verre » n'avait été fabriqué, assemblé et testé dans son ensemble en vue d'une instrumentation pour de grands projets. Durant cette étude, les objectifs étaient donc les suivants :

- Fabriquer des miroirs fins (que l'on appellera « slices » dans la suite du mémoire), à géométrie sphérique et tiltée avec des tolérances optiques sévères,
- Assembler ces slices,
- Réaliser les autres pièces optiques composant le système découpeur d'images (miroirs pupille et fente ou mini lentilles),
- Tester ces éléments optiques,
- Vérifier les performances optiques globales en vue d'une instrumentation pour des grands projets,
- Apporter les modifications nécessaires au système afin de l'améliorer,
- Proposer des solutions alternatives en terme de design et solutions techniques.

Ce manuscrit tente d'apporter quelques réponses à ces interrogations.

Un premier chapitre donne un état de l'art de l'instrumentation astronomique, des télescopes jusqu'aux spectrographes intégraux de champ basés sur le concept des découpeurs d'images. Le second chapitre présente les modélisations optiques faites sur le système découpeur d'images afin de comparer les résultats des tests optiques à ceux des simulations. Un calcul de zones de blocages sur le miroir découpeur ainsi qu'une simulation optique qui tient compte de la diffraction et des aberrations géométriques sont présentés.

Un troisième chapitre décrit les performances de deux découpeurs d'images pour l'instrumentation du JWST. Le premier prototype, financé sur des crédits de R&D de l'Observatoire de Lyon, a été dessiné, fabriqué et testé en collaboration avec le LAM et Cybernétix. Ce prototype est composé d'une pile de slices en Zérodur adhérentes moléculairement entre elles, et d'une barrette de miroirs pupille. Au sein d'un Consortium

européen (LAM, CRAL et Université de Durham), le second prototype financé par un contrat ESA, a été fabriqué, intégré et testé dans le visible à température ambiante et à température cryogénique. Trois jeux de miroirs en Zérodur (miroirs découpeur, miroirs pupille et fente) intégrés dans une structure mécanique constituent ce second prototype. Une étude comparative est faite entre les deux prototypes montrant la progression de la technologie de fabrication et d'assemblage des éléments optiques.

Le chapitre suivant vise à montrer la faisabilité d'un découpeur d'images pour la seconde génération d'instruments du VLT, pour l'European Southern Observatory (ESO). Le CRAL en tant que maître d'œuvre associé à sept instituts européens a formé un Consortium pour l'instrument MUSE (Multi Unit Spectrograph Explorer). Ce dernier, dont le champ est de une minute d'arc, a la particularité d'être divisé en 24 sous champs. Chacun d'eux alimente un découpeur d'images original associé à un spectrographe. Pendant l'étude de faisabilité (Phase A), un prototype a été fabriqué et testé avec des caractéristiques géométriques et optiques trois fois plus contraignantes que les deux prototypes précédents. Les résultats de ces tests associés à une étude rigoureuse de l'instrument ont permis de clore avec succès cette phase A.

Dans la phase suivante (Phase de design préliminaire), un nouveau design optique du découpeur d'images de MUSE a été proposé. Il a l'avantage d'être très compact et semble adapté à la technologie d'usinage diamant sur des métaux en vue d'une production en série de l'instrument. Trois prototypes ont été fabriqués puis testés à l'Observatoire de Lyon. Les résultats de ces prototypes sont présentés.

Le dernier chapitre met en parallèle les deux technologies « verre » et « métal ». Il compare ces deux dernières et donne quelques clés nécessaires au choix des découpeurs d'images adéquats pour les projets instrumentaux.

CHAPITRE 1

LA SPECTROSCOPIE INTEGRALE DE CHAMP

CHAPITRE 1

LA SPECTROSCOPIE INTEGRALE DE CHAMP

1 Introduction

La base de l'instrumentation astronomique est le télescope et la lunette qui permettent d'explorer tout le domaine spectral (des rayons X et γ jusqu'aux ondes radio). Ces instruments servent à collecter le rayonnement sur leur surface d'entrée, permettant ensuite de former une image d'objets très distants dans un « plan » dit focal accessible à l'observateur. C'est sur ce plan focal que viennent se greffer divers instruments qui répondent à des enjeux scientifiques très précis tels que l'étude des planètes et du soleil – la formation et l'évolution des étoiles et du milieu interstellaire – la cinématique, la dynamique, la formation et l'évolution des galaxies – la cosmologie...

La conception d'un instrument entraîne une forte interaction entre le corps des chercheurs et celui des ingénieurs et techniciens au sein d'un consortium international. Le Centre de Recherche Astronomique de Lyon est pionnier dans la conception d'instruments de type « spectrographes intégraux de champ » à base de micro-lentilles. Depuis quatre ans, une activité de Recherche et Développement (R&D) basée sur un système de découpeur d'images a vu le jour afin d'implémenter ce système dans les grands projets instrumentaux du James Webb Space Telescope (JWST) et du Very Large Telescope (VLT).

2 L'instrumentation en astronomie

L'astrophysique d'aujourd'hui s'appuie sur des outils instrumentaux de pointe. Le but de ce chapitre est de parcourir quelques-uns de ces grands principes, qui permettent de mesurer les informations spatiale, spectrale et temporelle présentes dans les signaux astrophysiques. Il montre comment recueillir, analyser, investiguer, redresser et interpréter ces derniers.

2.1 Collecter le signal

Collecter le signal, c'est assurer que les photons arrivent nombreux et en bon ordre aux différents foyers d'un télescope. Qualités optique et mécanique se conjuguent pour accomplir cette tâche.

Les premiers « collecteurs optiques » – les lunettes – ont été utilisés pour l'observation des astres au début du XVII^e siècle par l'Italien Galilée. Quant au premier télescope, c'est l'Anglais Isaac Newton qui l'a réalisé en 1672. De nombreux chercheurs ont ensuite proposé des formules optiques plus ou moins différentes, mais leurs travaux n'ont rien changé au fait qu'il n'existe que deux grandes familles d'instruments astronomiques (plus quelques hybrides): les réfracteurs (lunettes) et les réflecteurs (télescopes). Dans les premiers, les rayons lumineux sont renvoyés, réfractés, vers le foyer en traversant un assemblage de lentilles en verre appelé objectif. L'inconvénient est que l'aberration chromatique n'est jamais totalement supprimée, obligeant alors à ne travailler qu'à travers des filtres. Néanmoins, l'aberration de sphéricité et l'aberration extra axiale appelée « coma » peuvent être corrigés en ajustant la courbure des lentilles. Cela permet alors à une lunette d'être utilisée avec un angle de champ notable (de l'ordre de quelques degrés). Dans les réflecteurs, la lumière est réfléchi vers le foyer par la surface concave et asphérique d'un miroir principal appelé « primaire », puis par la surface

plane ou convexe d'un miroir plus petit, le secondaire. La position de l'image ne dépend pas de la longueur d'onde de sorte qu'un tel système bénéficie d'un achromatisme absolu. De plus, ce miroir assure la focalisation d'un faisceau parallèle à l'axe optique en un point unique de cet axe, le foyer. Un tel système est rigoureusement stigmatique sur l'axe. Cependant, hors de l'axe optique, un miroir parabolique donne des aberrations de coma qui ne permettent pas de l'utiliser avec un grand champ.

Une lunette ou un télescope est caractérisé par le diamètre D de son objectif et par sa distance focale f . Le rapport d'ouverture d'un instrument est la valeur f/D . Plus ce rapport est grand, plus l'image d'un objet étendu est grande dans le plan focal, mais moins elle est lumineuse. Plus le diamètre du collecteur est important, plus l'œil reçoit d'information lumineuse, et plus les images obtenues sont riches en détails.

Les télescopes s'appuient sur de multiples configurations optiques (Figure 1- 1). On note principalement :

- Le foyer primaire, situé devant le miroir primaire, qui occulte une partie du faisceau.
- Le foyer Cassegrain se situe juste derrière le miroir primaire du télescope. Un petit miroir hyperbolique fait converger le faisceau vers son second foyer, qui se situe alors près du miroir primaire; celui-ci est dans ce cas percé en son centre de façon à ce que le faisceau réfléchi par le miroir secondaire se focalise à travers cette ouverture au delà du miroir primaire.
- Le foyer Nasmyth est situé derrière le roulement de l'axe horizontal, il repose sur la plate-forme immobile et admet une instrumentation lourde.
- Le foyer Newton se retrouve sur le côté en haut du tube grâce à un petit miroir plan incliné de 45° placé peu avant le foyer primaire.
- Le foyer coudé est renvoyé, par un jeu de miroir, en une position qui ne bouge plus avec le télescope.

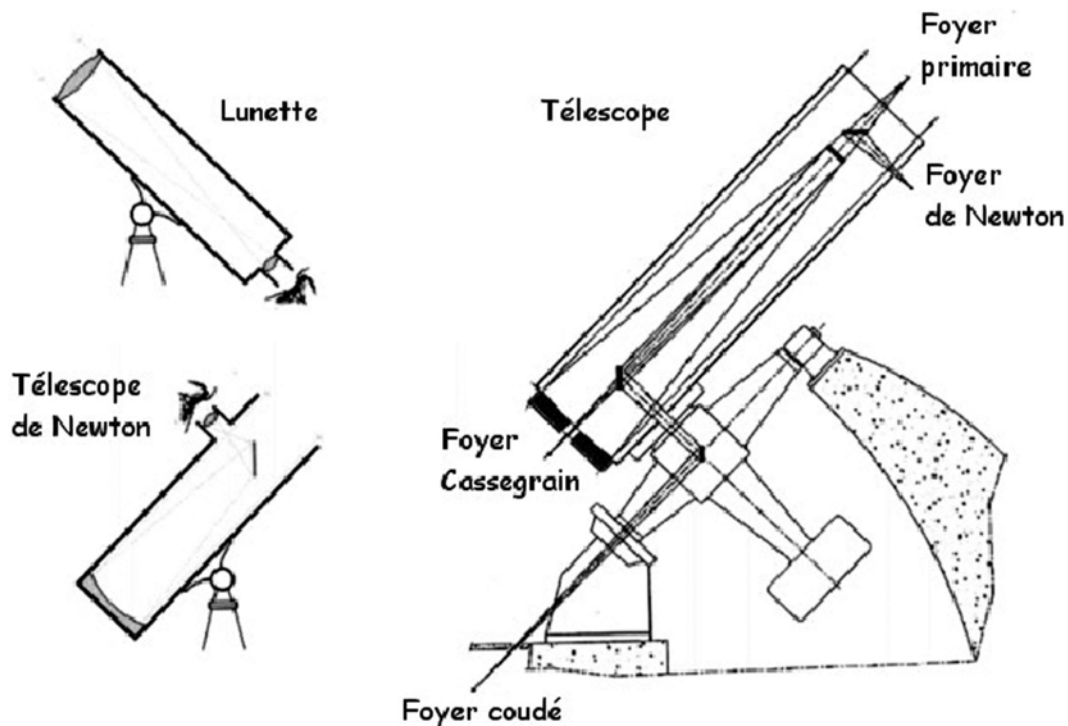


Figure 1- 1 : Divers montages optiques de télescopes

En astronomie, la précision du polissage des optiques est essentielle. En effet, la forme des miroirs doit s'approcher au mieux de la forme idéale (parabolique, plane...). A grande comme à petite échelle, en général, aucun défaut ne doit excéder $1/10$ de la longueur d'onde du rayonnement utilisé.

La turbulence atmosphérique vient altérer les images dans le plan focal, celles-ci apparaissant alors comme des taches fluctuantes en forme et en intensité, au rythme des variations de la réfraction atmosphérique. Pour limiter les effets néfastes de l'atmosphère, les grands observatoires sont ainsi placés au sommet de montagnes (par exemple le Pic du Midi dans les Pyrénées en France, le volcan Mauna Kea à Hawaï, le Cerro Paranal dans la Cordillère des Andes au Chili...).

Plutôt que de confier la forme idéale du miroir primaire à une position statique et rigide, l'optique active préfère inclure une chaîne de correction commandant la forme idéale du miroir au moyen d'actuateurs positionnant idéalement chaque sous élément du miroir. D'autres déformations des images, dues à la turbulence atmosphérique, sont plus rapides (fréquences de l'ordre du Hertz). Pour les compenser, on utilise l'optique adaptative qui consiste à analyser en temps réel les défauts de planéité de la surface d'onde qui arrive sur le miroir principal à l'aide d'un analyseur de front d'onde, et de réagir rapidement en compensant ces défauts par la déformation ajustée d'une lame mince interposée dans le faisceau au voisinage du foyer. Les performances de ces systèmes d'optique active et adaptative sont tels que l'on arrive maintenant à neutraliser presque complètement la turbulence atmosphérique sur les très gros télescopes construits ces dernières années, et ceci sur des champs de vision de l'ordre de quelques minutes d'arc.

Les diamètres des télescopes ont régulièrement augmenté, pour collecter plus de photons. Aujourd'hui, les plus grands mesurent par exemple 8 m pour le VLT ou Gemini et 10 m pour le Keck. Divers projets de télescopes optiques de miroir primaire de 30 à 100 m sont en cours d'étude. Le projet Overwhelmingly Large (OWL) de l'European Southern Observatory (ESO) prépare la classe des télescopes de 100 m [1]. Si le principe des très grands télescopes est mûr, leur réalisation pratique pose problème: ils offrent une telle prise au vent que leur utilisation ne peut être menée, dans les sites d'observation actuels, que par vent quasi nul.

2.2 Mettre en forme le signal

L'information recherchée dans un signal s'exprime de diverses façons. Cette section présente les grands principes mis en œuvre et les techniques instrumentales associées, pour traiter au mieux les photons selon:

- Leur origine et leur position,
- Leur quantité,
- Leur couleur,

Et toute combinaison de ces trois propriétés, sans oublier éventuellement leurs variations temporelles.

L'information portée par les photons peut être traitée de diverses façons, ainsi que le montrent les illustrations suivantes :

- Astrométrie : Repérages de positions, pour la mesure de distance et de mouvement.
- Imagerie : Cartographie, pour une étude morphologique, statistique, sans ou à très faible résolution spectrale, ou bien dans des filtres très précis.
- Photométrie : Mesure de flux lumineux, dans des bandes spectrales bien définies. Les mesures photométriques nécessitent d'excellentes conditions atmosphériques.

- Bolométrie : Mesure de flux lumineux, l'énergie des photons incidents (essentiellement les domaines X et IR) étant convertie en agitation thermique dans le détecteur, dont la résistance électrique varie avec la température. Les bolomètres n'ont intrinsèquement aucune sélectivité spectrale.
- Interférométrie : Méthode d'observation qui exploite les interférences entre les images obtenues via deux sources distinctes, mais cohérentes entre elles. L'interférométrie est utilisée en astronomie aussi bien avec des télescopes optiques qu'avec des radiotélescopes. Son avantage est de permettre une résolution équivalente à celle d'un miroir (ou radiotélescope) de diamètre équivalent à l'écart entre les instruments combinés. Le contraste des franges permet ensuite d'obtenir une information sur la taille de l'objet observé ou sur la séparation angulaire entre deux objets observés (par exemple, un système étoile - planète).
- Polarimétrie : Plusieurs images simultanées sont générées en utilisant des polarisations différentes. On étudie alors les différences d'intensité entre ces images.
- Spectrométrie : Identification des photons selon leur couleur. Différents types de spectromètres sont utilisés en astronomie : spectromètre à résonance, spectromètre interférentiel (spectromètre par transformée de Fourier, Fabry-Pérot, spectromètre à réseau), spectromètre hétérodyne. Selon différents critères (largeur spectrale admissible, résolution spectrale) l'une ou l'autre des techniques s'impose.
- Spectro-imagerie : Les photons sont traités pour recueillir simultanément les informations spatiale et spectrale qu'ils véhiculent. La spectro-imagerie permet l'obtention de l'information spectrale pour toute une région spatiale. Selon les techniques (spectroscopie multi-objets ou intégrale de champ), cette région peut être un ensemble de différentes cibles ponctuelles ou un objet étendu. Cette technique sera développée dans le paragraphe 3.

2.3 Détecter le signal

Plus de 10 ordres de grandeurs séparent les énergies des photons γ à radio. Les techniques de détection, tout comme les détecteurs, sont évidemment bien différentes selon le domaine spectral.

Les photographies astronomiques réalisées depuis plus de 150 ans représentent une archive du ciel, permettant de mesurer la position des objets célestes à diverses dates et d'en déduire leurs déplacements, mais aussi de déterminer leur luminosité et ses variations éventuelles. Cependant, l'efficacité médiocre des plaques photographiques fait que d'autres capteurs plus performants les remplacent, mais pour le moment, les images du ciel à grand champ (sur plusieurs degrés) sont seulement réalisables avec des grandes plaques photographiques placées au foyer de lunettes ou de télescopes. Aujourd'hui, Mégacam est le premier instrument à réaliser une mode imageur grand champ basé sur des mosaïques de plusieurs détecteurs [2].

Un capteur CCD (Charge Coupled Device) se traduirait en français par DTC : « dispositif à transfert de charge ». Cette technologie fut introduite en 1969, et est en usage en astronomie depuis la fin des années 70. Il s'agit de détecteurs pour les domaines visible, infrarouge et proche ultraviolet (UV). Le principe peut être résumé comme suit. Chaque pixel de la matrice CCD correspond à un élément semi-conducteur en sandwich dans un condensateur électrique. Un photon incident crée un photo-électron, lorsqu'il apporte à un électron du matériau semi-conducteur l'énergie nécessaire pour franchir le seuil énergétique. Les photo-électrons sont stockés dans le puits de potentiel qu'est le pixel convenablement polarisé. La lecture de ces

photo-électrons est commandée par polarisation via des transistors à effet de champ. Elle a lieu soit directement, un obturateur cachant la source, soit par transfert de trame.

Les principales caractéristiques d'un détecteur CCD sont :

- Le rendement quantique qui mesure le rapport du nombre de photo-électrons créés au nombre de photons incidents.
- La dynamique qui doit être grande et linéaire (jusqu'à la saturation, lorsque le puits de potentiel est plein)
- Le bruit de fond caractérisé par le courant d'obscurité, le champ plat et le biais (offset) qui doivent être faible.
- La taille dont les dimensions actuelles maximales pour l'observation astrophysique sont de 4000×4000 pixels (la taille est le seul domaine où la plaque photographique propose de meilleures performances).
- Le domaine spectral qui est fonction du matériau semi-conducteur (de 0.4 à 1.2 μm pour le silicium), mais aussi de son éventuel dopant.

De nos jours, la R&D sur les CCD porte sur leurs caractéristiques géométriques (dimensions et épaisseur), l'espace entre les pixels et sur le bruit de fond.

2.4 Analyser et traiter le signal

L'instrumentation astrophysique conduit souvent à des observations à la limite de ce qui est faisable. Les signaux, obtenus après des heures d'observations chèrement acquises, doivent être traités afin d'en extraire l'information scientifique pertinente pour donner les meilleurs traitements appropriés. Cette section se propose d'étudier plus précisément quelques unes des techniques de base de traitement du signal.

La détection d'un phénomène, comme par exemple une raie spectrale, nécessite de pouvoir distinguer le signal par rapport à ce qui n'est pas du signal, appelé bruit s'il présente un caractère aléatoire. On exprime ceci par un rapport, le rapport signal à bruit, d'autant plus important que le signal est fort par rapport au bruit. En pratique, une raie a priori inconnue devient détectable pour un rapport signal à bruit supérieur à 5. L'image astronomique numérique ainsi obtenue à l'issue d'une pose de durée T n'est pas exactement représentative du nombre de photons reçu durant ce temps par chaque photosite car les charges du détecteur CCD qui y sont accumulées ne sont pas uniquement dues à l'effet photoélectrique. Il faut corriger cette image « brute » en tenant compte du bruit thermique, du bruit électronique et des défauts d'uniformité. De plus, dans la chaîne de traitement du signal, des observations brutes au résultat final, une étape souvent essentielle consiste à s'affranchir de signaux parasites. Diverses techniques existent pour corriger le signal: filtre par moyenne glissante, filtre par moyenne linéaire, estimation linéaire, traitement d'un point aberrant, filtrage en fréquence...

En conclusion, l'instrumentation astronomique peut se diviser en 4 étapes:

- Choisir un collecteur à photons aux propriétés voulues, souvent le plus grand possible, et transformer le front d'onde initial en un front d'onde corrigé,
- Analyser les photons pour les compter, les classer par couleur et/ou les repérer spatialement,
- Convertir le signal lumineux en signal électrique, sans perdre aucune des propriétés gagnées par l'instrument,
- Traduire les observables en mesures physiquement pertinentes.

3 La spectroscopie

De nos jours, la majeure partie de nos connaissances sur les astres découle de la spectroscopie qui permet l'obtention de la répartition de l'énergie lumineuse selon la longueur d'onde (spectre) d'un élément du ciel. On distingue différents types de spectrographes tels que le spectrographe à dispersion, à transformée de Fourier ou à base d'interféromètres de Fabry-Pérot.

Un spectrographe classique à dispersion est composé de (Figure 1- 2):

- Une fente d'entrée placée dans le plan objet,
- Un collimateur qui transforme un faisceau convergent en un faisceau parallèle,
- Un prisme, un réseau ou un grism qui disperse la lumière,
- Une caméra qui focalise le faisceau sur le plan image,
- Un détecteur placé dans le plan image.

Pour obtenir une information spectrale pour plusieurs objets, plusieurs points du champ ou bien sur tout un champ, on utilise des spectrographes classiques associés à un module placé en amont qui permet d'échantillonner et de réarranger le champ à l'entrée d'un spectrographe. La Figure 1- 3 résume les différents spectrographes présents dans l'instrumentation astronomique. La « spectroscopie intégrale de champ », dont l'Observatoire de Lyon a été l'un des précurseurs, est composée de trois grandes techniques d'échantillonnage [4].

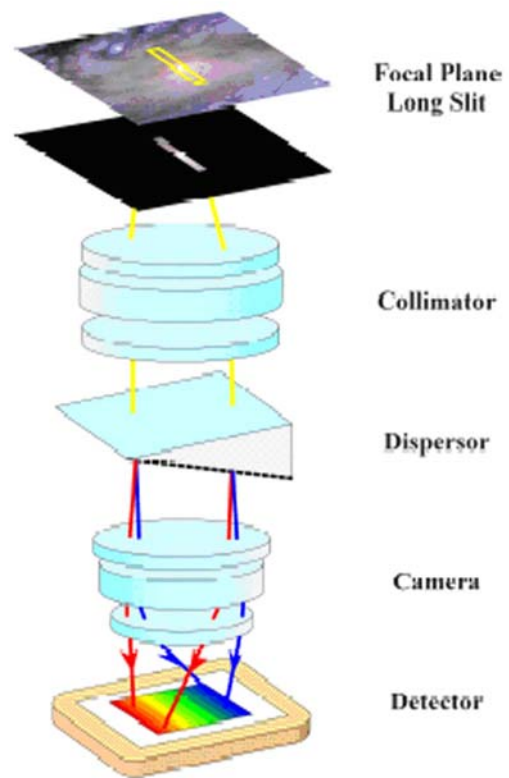


Figure 1- 2 : Principe d'un spectrographe classique [3]

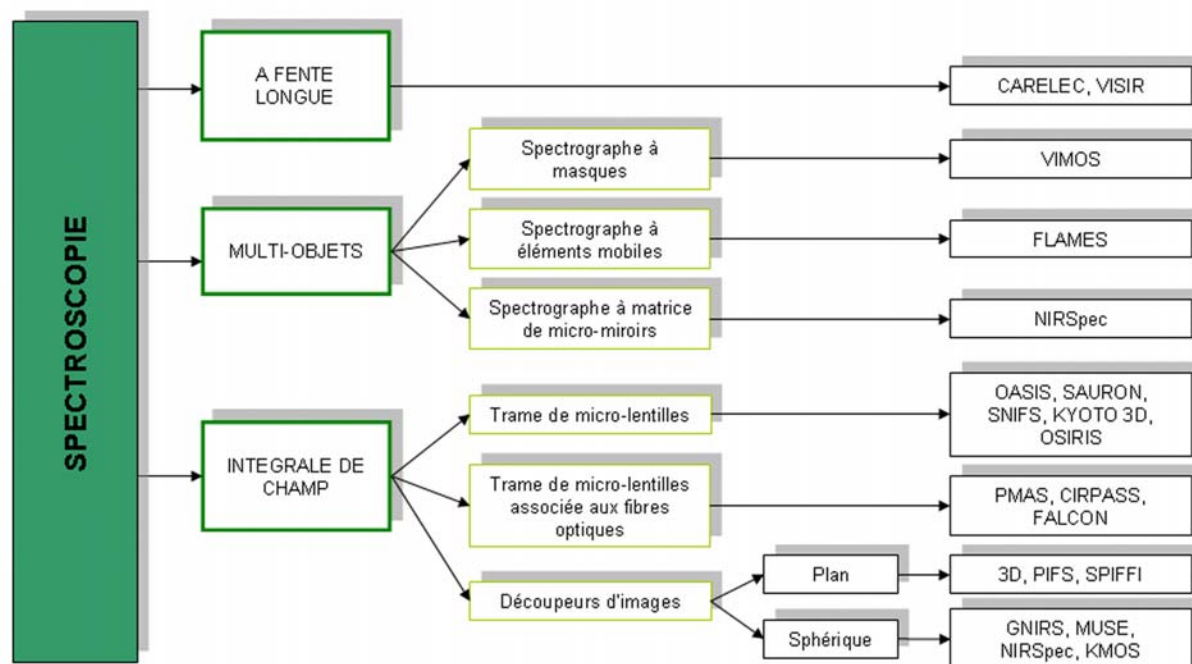


Figure 1- 3 : Organigramme des différents spectrographes appliqués pour l'astronomie

3.1 La spectroscopie à fente longue

La spectroscopie à fente longue a pour objet l'enregistrement simultané de spectres à basse ou moyenne résolution spectrale pour les différentes sources sélectionnées par la fente. Le flux issu de chaque sous région de la fente est dispersé. La dispersion étant perpendiculaire à la fente, l'image bidimensionnelle finale résulte du produit de 2 dimensions (2D) : l'une est spectrale, l'autre est spatiale. Il s'agit de la méthode la plus directe et la plus courante au problème de stockage d'une information initialement 3D sur un détecteur 2D (Figure 1- 2).

Les avantages de ce spectrographe sont qu'il n'y a pas de superposition des spectres et qu'il est possible de regagner la dimension perdue en déplaçant la fente au cours d'observations successives. Néanmoins, cette reconstruction d'objet nécessite une stabilité de l'instrument difficile à obtenir ailleurs que dans l'espace et souffre d'une sensibilité à la turbulence atmosphérique. De plus, la géométrie du masque en forme de fente est mal adaptée à celle des objets observés. Le spectrographe CARELEC [5] du 1.93 m de l'Observatoire de Haute Provence (OHP) et VISIR [6] installé sur le troisième télescope du VLT sont des spectrographes à fente longue.

3.2 La spectroscopie multi-objets

Les spectrographes multi-objets sont destinés à obtenir simultanément les spectres d'une collection d'objets spatialement distincts et souvent distants. Ceci revient à placer le plus grand nombre de fentes possible dans le plan d'entrée d'un spectrographe classique de sorte que les spectres ne se chevauchent pas. Ces contraintes ont conduit au développement de plusieurs concepts. A noter que tous ces concepts nécessitent une connaissance des positions et des morphologies des objets à observer (par exemple à l'aide d'observations antérieures en imagerie).

3.2.1 Spectrographe à masques

Pour ce type d'instrument, des fentes ou de simples trous sont découpés au laser dans un masque à la position de chacun des objets à observer. Une variante consiste à coupler les trous à des fibres optiques afin d'optimiser l'utilisation du détecteur. L'avantage de ce concept est qu'il permet d'observer un nombre extrêmement important d'objets par pose (en particulier dans la variante à fibres). Ce concept n'est pas viable dans l'espace puisqu'un masque doit être réalisé pour chaque observation. De plus, il est sensible à l'effet de fente¹ et à la réfraction atmosphérique. L'instrument VIMOS possède deux modes dont un spectrographe à masques [7].

3.2.2 Spectrographe à éléments mobiles

Dans ce concept, le masque est remplacé par de petits éléments mobiles qui vont se positionner sur les objets à observer. Ces éléments peuvent être des fibres individuelles ou bien de petits fagots de fibres. Le nombre limité d'éléments mobiles entraînant rapidement une grosse complexité de réalisation en fait son principal inconvénient. Il a l'avantage de présenter une alternative à l'utilisation des masques. L'instrument FLAMES est basé sur cette technologie [8].

3.2.3 Spectrographe à matrice de micro-miroirs ou micro-obturbateurs

Derniers-nés dans la catégorie des spectrographes multi-objets, ces spectrographes sont basés sur l'utilisation d'une matrice de micro-miroirs ou micro-obturbateurs qui peuvent être adressés individuellement et prendre soit la position « ouverte », soit une position « fermée ». Il est ainsi possible de sélectionner à volonté toutes les régions du ciel observées.

Ce système a pour avantage une grande souplesse d'utilisation de la matrice et donne une alternative aux masques pour les projets spatiaux. Néanmoins, il est sensible à l'effet de fente et les matrices, bijoux de haute technologie, sont en cours de développement. C'est ce type de concept qui devrait équiper le spectrographe proche infrarouge NIRSpec du JWST (Figure 1-4) [9]. Ces spectrographes multi-objets permettent d'obtenir simultanément le spectre de nombreux petits objets. En revanche, cette technique est difficilement applicable à l'étude d'objets étendus.

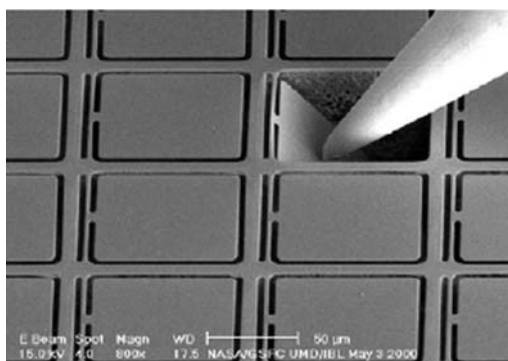


Figure 1- 4 : Micro-shutter (Goddard Space Flight Centre)

¹ On parle d'effet de fente lorsque l'image de l'objet est plus fine que la fente. Dans ce cas, les déplacements de l'objet par rapport au centre de la fente produisent un décalage en longueur d'onde sur le détecteur.

3.3 La spectroscopie intégrale de champ

Comme mentionné dans les sections précédentes, le problème majeur rencontré par la spectroscopie est que l'information désirée est à trois dimensions, tandis que les détecteurs n'en possèdent pour l'instant que deux. Dans ce contexte, les vingt dernières années ont vu la naissance d'une nouvelle génération de spectrographes, dits « intégraux de champ » (Integral Field Spectrograph – IFS), qui permettent d'obtenir en une seule pose les spectres d'un champ de vue complet ce qui en fait un atout par rapport aux concepts présentés précédemment. Pour répondre à cette exigence, les spectrographes intégraux de champ sont équipés d'un échantillonneur de champ générant trois grands types de spectrographes.

3.3.1 Concept à base de trames de micro-lentilles

Au début des années 1980, Georges Courtès eu l'idée d'échantillonner le champ à l'aide d'une trame de micro-lentilles [10]. Le premier prototype est l'instrument TIGER conçu et réalisé à l'Observatoire de Lyon [11]. Le schéma optique donné sur la Figure 1- 5 s'organise de la manière suivante. L'image dans le plan focal du télescope est agrandie, filtrée et focalisée sur la trame de micro-lentilles. Cette dernière effectue l'échantillonnage spatial. Chaque micro-lentille donne une image de la pupille du télescope en sortie, dont la taille est plus petite que le diamètre de la lentille. Les faisceaux issus des lentilles traversent le collimateur, ce qui permet de les rendre parallèles entre eux. Le grism disperse chaque faisceau parallèle et les spectres désirés sont ainsi enregistrés sur un capteur CCD. Une légère rotation de la trame de micro-lentilles et l'utilisation d'un filtre limitant le domaine spectral permet d'obtenir des spectres sur le détecteur sans risque de chevauchement.

Les avantages sont les suivants :

- Insensibilité à l'effet de fente puisqu'on disperse la pupille
- Très bonne qualité spectro-photométrique, conséquence directe de l'espacement entre les spectres

En revanche, pour éviter le chevauchement spectral, le nombre de pixels spectraux est limité et certains spectres sont tronqués. De plus, la répartition des spectres sur le CCD n'est pas très compacte créant ainsi des zones « inutilisées ».

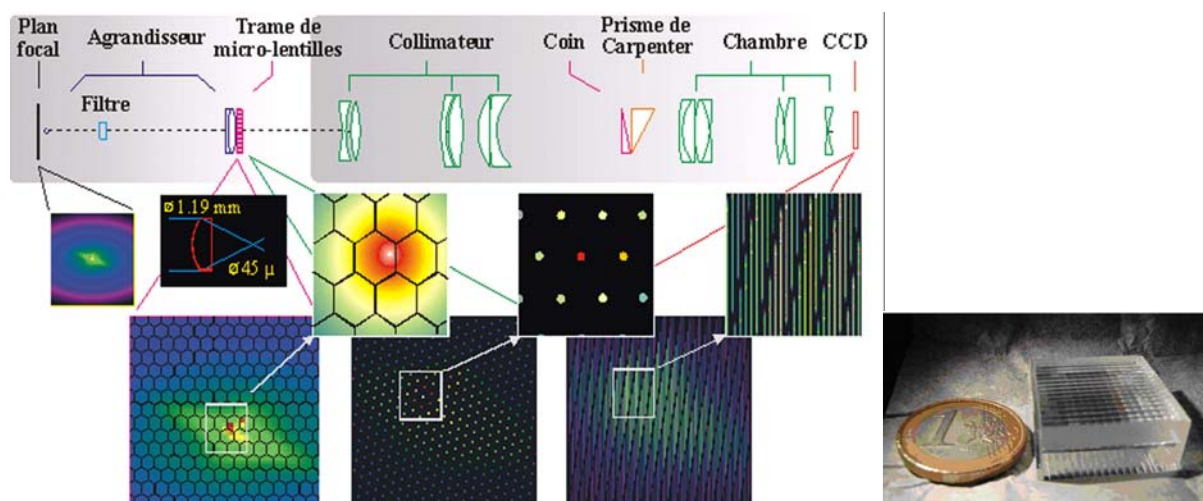


Figure 1- 5 : A gauche : Principe optique du spectrographe TIGER à base de micro-lentilles. A droite : Trame de micro-lentilles de l'instrument SNIFS

D'autres instruments comme OASIS [12], SAURON [13], SNIFS [14], KYOTO 3D [15] ou OSIRIS [16] sont basés sur ce même concept optique.

3.3.2 Concept à base de micro-lentilles associé avec des fibres optiques

Dans ce concept, la trame de micro-lentilles réalise l'échantillonnage spatial. Les fibres optiques transportent l'information et sont arrangées le long d'une fente à l'entrée d'un spectrographe. Le couplage micro-lentilles – fibres conserve le rapport d'ouverture des micro-lentilles par insertion correcte de l'intensité lumineuse dans la fibre. Ce concept propose une bonne compacité des spectres sur le détecteur CCD avec un nombre de pixels spectraux élevé. Néanmoins, ce concept débouche sur une phase d'assemblage et d'intégration longue et complexe. Le spectrographe intégral de champ VIMOS [17], installé sur le VLT, possède une trame de 80×80 microlentilles ce qui représentent 6400 fibres à aligner et à fixer. De plus, les fibres optiques sont mal adaptées dans le proche infrarouge et en environnement cryogénique. Les instruments PMAS [18], CIRPASS [19] et FALCON [20] sont aussi équipés d'un concept à base de micro-lentilles associé avec des fibres.

3.3.3 Concept à découpeurs d'images

3.3.3.1 Historique

Tout comme pour les spectrographes à base de fibres optiques, l'idée est de réarranger l'image le long d'une fente. Mais ici, le cœur du montage est un système découpeur d'images (« image slicer » en anglais) qui se présente sous la forme d'un empilement de miroirs fins (« slices » en anglais) inclinés les uns par rapport aux autres. Chacun de ces miroirs découpe une tranche de l'image et la décale par rapport à sa voisine pour éviter tout chevauchement des spectres au moment de la dispersion.

Le premier à employer le mot anglais « image slicer » est Bowen en 1938 [21]. Son concept consiste en un empilement de miroirs plans formant une fente à l'entrée du spectrographe où est placé une lentille cylindrique permettant de diminuer la largeur des spectres. Le but de ce découpeur d'images est de placer toute la lumière de l'objet dans la fente. Le découpeur d'images décrit par Bowen a été fabriqué en 1965 par Pierce [22]. A la fin des années 1960, Walraven proposa une version modifiée du « Bowen image slicer ». Les miroirs sont remplacés par des réflexions totales à l'intérieur de lames parallèles en quartz qui sont collées par contact optique sur un prisme (Figure 1- 6). Ce concept a été repris et fabriqué par Simmons en 1980 [23]. En 1970, Richardson améliore le concept précédent en proposant une série de superpositions de réflexions multiples à l'aide de miroirs concaves placés les uns en face des autres [24]. Mais, le but de tous ces découpeurs d'images n'était pas de faire de la spectroscopie intégrale de champ puisque cette dernière a vu le jour grâce aux concepts à base de fibres optiques ou de micro-lentilles. Et ce n'est qu'en 1996, que Weitzel applique le concept de découpeur d'images pour la spectroscopie intégrale de champ lors de la conception de l'instrument 3D [25]. Ce découpeur d'images est composé de deux jeux de 16 miroirs plans en Zérodur et assemblés par adhérence moléculaire (Figure 1- 7). Le plan focal du télescope est imagé sur le premier miroir découpeur qui découpe l'image. Le second miroir découpeur réarrange le champ le long d'une fente à l'entrée d'un spectrographe. Ce concept souffre d'un problème de défocalisation de la fente limitant le nombre d'élément de résolution et d'un grandissement forcément égal à un produisant une longue fente difficilement adaptable à certains spectrographes. Les spectrographes PIFS [26] et SINFONI [27] sont construits sur le même concept. En 1997, Content présente un concept optique de découpeur d'images permettant de s'affranchir des limitations précédentes [28]. En effet, il propose de remplacer les miroirs plans par des miroirs sphériques permettant de diminuer la longueur de la fente de sortie (Figure 1- 8).

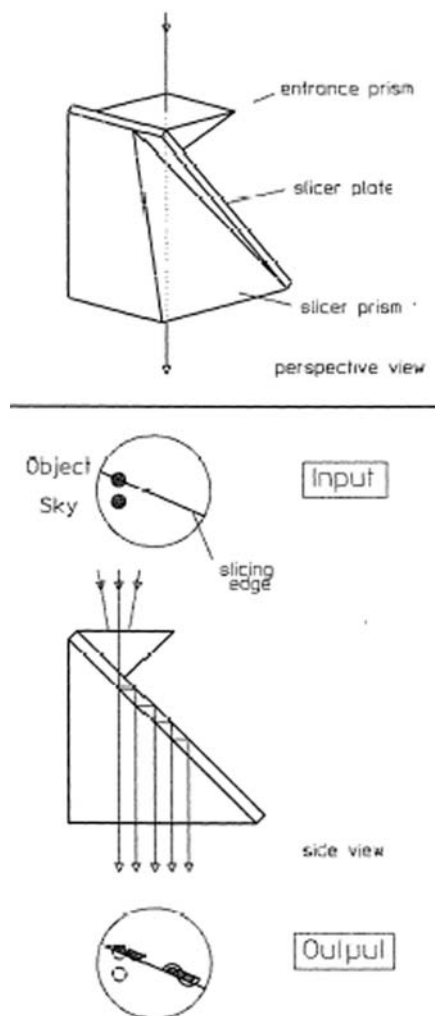


Figure 1- 6 : Le découpeur d'images de Bowen-Walraven

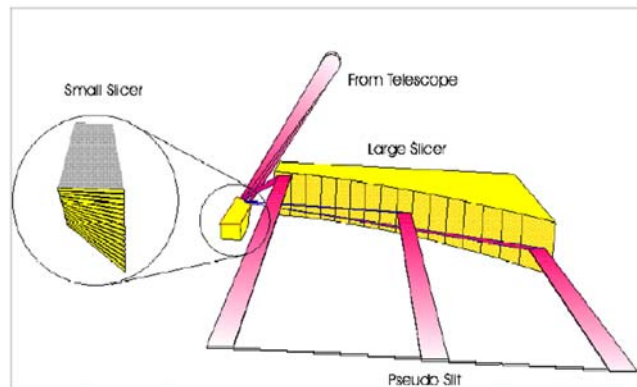


Figure 1- 7 : Découpeur d'images de Weitzel

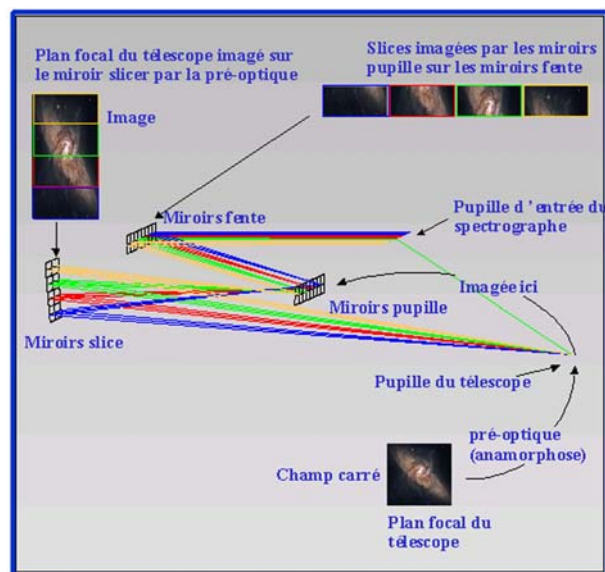


Figure 1- 8 : Concept du découpeur d'images proposé par Content, 1997

3.3.3.2 Principe d'un découpeur d'images

Ce découpeur d'images (Figure 1- 8) est basé sur un schéma optique comportant deux conjugaisons optiques : l'une sur la pupille du télescope et l'autre sur le plan focal du télescope. Il a pour but de transformer un champ objet rectangulaire en une série de mini fentes placées bout à bout à l'entrée d'un spectrographe, puis de réimager la pupille du télescope sur la pupille d'entrée du spectrographe.

Il est composé principalement de trois éléments optiques:

- Le miroir découpeur, composé d'un empilement de slices, découpe le champ et dévie les tranches d'images dans différentes directions puis forme l'image de la pupille du télescope sur les éléments pupille.
- Les éléments pupille (miroirs ou lentilles), forment l'image du miroir découpeur sur la pseudo fente d'entrée du spectrographe, en lui assurant un positionnement et un grandissement correct.
- Les éléments fente (miroirs ou lentilles) réimagent la pupille du télescope sur la pupille d'entrée du spectrographe.

Dans certains cas comme l'instrument MUSE, le découpeur d'images peut être constitué de deux éléments : le miroir découpeur et une matrice de miroirs secondaires jouant le rôle des éléments pupille et fente.

Le détail du principe du découpeur d'images sera présenté au Chapitre 2.

3.3.3.3 Développements actuels et futurs

Aujourd'hui, de nombreux spectrographes intégraux de champ à base de découpeurs d'images ont été planifiés, conçus voire installés sur de nombreux télescopes. En effet, le Tableau 1- 1 récapitule les principaux projets de découpeurs d'images basés sur différents concepts, technologies et domaine de longueur d'onde.

Comme le montre le Tableau 1- 1, le nombre de projets instrumentaux basés sur le concept des découpeurs d'images a augmenté depuis les années 2000 que ce soit pour une instrumentation sol ou dans l'espace. Deux grandes familles se distinguent : les découpeurs d'images à miroirs plans et ceux à miroirs sphériques. Outre leurs caractéristiques géométriques, les technologies de fabrication, d'assemblage et les matériaux sont différents d'un projet à l'autre. En général, on privilégie la technologie « verre » pour les longueurs d'onde visible et la « métallique » pour l'infrarouge. Les méthodes d'assemblage sont propres aux fournisseurs ; elles peuvent être mécanique (serrage par des jeux de vis) ou optique par adhésion moléculaire.

Certains instruments opérationnels tels que UIST [30] et GNIRS [31] utilisent déjà des découpeurs d'images en technologie « métallique » dans le domaine infrarouge. Mais en 2001, aucun système découpeur d'images en technologie « verre » à miroirs sphériques appliqué au visible n'avait été fabriqué, testé et validé pour une instrumentation. A cette date, l'Observatoire de Lyon a lancé une étude de R&D sur la faisabilité d'un concept découpeur d'images en technologie « verre » pour la spectroscopie intégrale de champ, en collaboration avec le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM), qui avait déjà étudié quelques designs de découpeurs d'images [29]. C'est dans ce contexte novateur qu'une thèse a été proposée sur un financement CIFRE entre la société Cybernétix SA et l'Observatoire de Lyon. Cette thèse étudie les performances optiques sur trois prototypes découpeurs d'images en technologie « verre » avec des miroirs sphériques et tiltés. La fabrication, l'assemblage ainsi que les tests optiques portant sur les spécifications de haut niveau seront présentés afin de valider les systèmes découpeurs d'images en technologie « verre ». On verra que les difficultés techniques et les spécifications deviennent plus contraignantes du premier au troisième prototype. De plus, cette thèse comporte une étude sur les découpeurs d'images en technologie « métallique » appliqués au domaine de longueur d'onde visible. En effet, trois prototypes ont été fabriqués puis testés. Un comparatif détaillé entre ces deux technologies de fabrication de découpeur d'images sera présenté afin de mieux cerner les avantages et les inconvénients de chacun, pour que la communauté scientifique et technique puisse adapter son découpeur d'images à son projet instrumental.

| SPECTROGRAPHE | TELESCOPE | λ (μm) | FoV (arcsec ²) | TYPE D'IMAGE SLICER | MATÉRIAU | ASSEMBLAGE | NOMBRE DE SLICES | DIMENSION D'UNE SLICE (mm) | ÉTAT DE L'INSTRUMENT | AUTEUR |
|------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|------------------|----------------------------|----------------------|-----------------|
| 3D | Calar Alto (3.5m) | 1.0-2.5 | 8×8 | Plan | Zérodur | | 16 | | Opérationnel | Weitzel, 1996 |
| PIFS | 200 inch Hale Telescope | 1.0-5.0 | 7×7 | Plan | Aluminium | Individuel | 8 | 17.8×1.17 | Opérationnel | Murphy, 1999 |
| SINFONI (SPIFFI) | VLT | 1.0-2.5 | 8×8 et 3.2×3.2 et 0.8×0.8 | Plan | Zérodur | Adhérence moléculaire | 32 | 16×0.4 | Opérationnel | Tecza, 2000 |
| FISICA | GTC (10.4m) | 1.0-2.5 | 6×12 | Sphérique et tilté | Aluminium | Monolithique | 22 (2×11) | 9.1×0.195 | Prototypé | Glenn, 2004 |
| | KPNO (4m) | 1.0-2.5 | 16×33 | | | | | | | |
| GNIRS | Gemini | 1.0-2.5 | 5×3 | Sphérique et tilté | Aluminium | Monolithique | 21 (2×11) | 10.9×0.79 | Opérationnel | Dubbeldam, 2000 |
| SWIFT | 8m | 0.7-1.0 | 6.6×13.4 | Plan | Zérodur | Individuel | | 0.25 | En projet | Thaite, 2005 |
| | 4m | | 13.2×26.7 | | | | | | | |
| UIST | UKIRT | 1.0-5.0 | 5.3×5.3 | Sphérique et tilté | Aluminium | Monolithique | 18 | 27×0.95 | Opérationnel | Wells, 2000 |
| NIFS | Gemini | 1-2.5 | 3.2×3.2 | Plan | Zérodur | Mécanique | 32 | 11×0.33 | Prototypé | McGregor, 1999 |
| WiFeS | ANU (2.3m) | 0.32-1 | 25×31 | Sphérique et tilté | Zérodur | Mécanique | 25 | 35×1.75 | Prototypé | Doolan, 2004 |
| PIRIS | Steward Observatory | IR | 8×8 | Sphérique et tilté | Aluminium | Individuel | 8 | 16×2 | Opérationnel | Ren, 2004 |
| KMOS | VLT | 1.0-2.5 | 2.8×2.8 | Sphérique et tilté | Aluminium | Monolithique | 112 | | En projet | Content, 2005 |
| FRIDA | Télescope du Mexique | 0.9-2.5 | 0.65×1.3 | Sphérique et tilté | Aluminium | Monolithique | 18 | 0.4 | En projet | Cuevas, 2005 |
| MUSE | VLT | 0.465-0.93 | 60×60 | Sphérique et tilté | Zérodur | Adhérence moléculaire | 24×38 | 81×1.6 | Prototypé | Hénault, 2004 |
| | | | | Sphérique et tilté | Aluminium | Monolithique | 24×4×12 | 33.25×0.93 | | Laurent, 2005 |
| MIRI | JWST | 5-7.8 | 3.7×3.7 | Sphérique et tilté | Aluminium | Monolithique | 21 | 9.3×1 | Prototypé | Lee, 2004 |
| | | 7.7-11.9 | 4.5×4.7 | | | | 17 | 14.7×1.2 | | |
| | | 11.8-18.3 | 6.1×6.2 | | | | 16 | 15.4×1.3 | | |
| | | 18.2-28.3 | 7.9×7.7 | | | | 12 | 15.7×1.8 | | |
| SNAP | SNAP (2m) | 0.35-1.7 | 3.0×3.0 | | | | | | En projet | Ealet, 2003 |
| NIRSPEC | JWST | 0.7-5.0 | 2×2 | Sphérique et tilté | Zérodur | Adhérence moléculaire | 40 | 10×0.5 | Prototypé | Prieto, 2003 |
| | | | 3×3 | | Aluminium | Monolithique | 30 | 12×0.8 | En projet | Laurent, 2004 |
| MOMFIS | OWL | 1.0-2.5 | 120×120 | | | | | | En projet | Prieto, 2005 |
| IFU | Solar Telescope | 0.39-1.0 | 9×2.6 | Sphérique et tilté | Aluminium | | | | En projet | Ren, 2003 |

Tableau 1- 1 : Projets instrumentaux à base de découpeurs d'images

4 Conclusion

Quelques siècles séparent le premier télescope du premier concept de découpeurs d'images pour la spectroscopie intégrale de champ. Ce chapitre a tenté d'en résumer brièvement l'histoire. Il présente les différents concepts de spectroscopie pour enfin s'appuyer sur le

dernier-né des spectrographes intégraux de champ à base de découpeurs d'images, en attendant de voir émerger les détecteurs dont les pixels seront sensibles à la longueur d'onde.

Références

1. Monnet, G., D'Odorico, S., 2004, "Towards instrumentation for ELTs: the OWL case", Proc. SPIE 5492, 1810
2. Boulade et al., 2003, "MegaCam: the new Canada-France-Hawaii Telescope wide-field imaging camera", Proc. SPIE 4841, 72
3. Bacon, R., 2000, "Spectrographs: Integral Field Units", Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics
4. Ferruit, P., 2001, "Synthèse des différents concepts de spectrographes en astronomie", Atelier de l'optique en astronomie
5. Lemaître et al., 1990, "Reflective aspherized grating spectrographs for the Haute-Provence and Nanjing observatories - MARLYs and CARELEC", A&A, 228, 546
6. Lagage et al., 2000, "Final design of VISIR: the mid-infrared imager and spectrometer for the VLT", Proc. SPIE 4008, 1120
7. Le Fevre et al., 2002, "VIMOS and NIRMOS multi-object spectrographs for the ESO VLT", Proc. SPIE 4008, 546
8. Pasquini et al., "FLAMES: a multi-object fiber facility for the VLT", Proc. SPIE 4008, 129
9. Moseley et al., 2004, "Microshutter Arrays for JWST NIRSpec", AAS, 205, 0507
10. Courtés, G., 1982, "An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes", IALO, 123
11. Bacon et al., 1995, "3D spectrography at high spatial resolution. I. Concept and realization of the integral field spectrograph TIGER", A&AS, 113, 347
12. Benn et al., 2003, "OASIS at the WHT", ING Newsl., 7, 21
13. Bacon et al., 2001, "The SAURON project - I. The panoramic integral-field spectrograph", MNRAS, 326, 23
14. Lantz et al., 2004, "SNIFS: a wideband integral field spectrograph with microlens arrays", Proc. SPIE 5249, 146
15. Ohtani et al., 1998, "Kyoto Tridimensional Spectrograph I", Proc. SPIE 3355, 750
16. Larkin et al., 2003, "OSIRIS: infrared integral field spectrograph for the Keck adaptive optics system", Proc. SPIE 4841, 1600
17. Bonneville et al., 2003, "The VIRMOS very wide integral field unit for the VLT: integration and performances", Proc. SPIE 4841, 1771
18. Roth et al., 2005, "PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. I. Design, Manufacture, and Performance", PASP, 117, 620
19. Parry et al., 2000, "CIRPASS: a NIR integral field and multi-object spectrograph", Proc. SPIE 4008, 1193
20. Hammer et al., 2002, "The FALCON Concept: Multi-Object Spectroscopy Combined with MCAO in Near-IR", Scientific Drivers for ESO Future VLT/VLTI Instrumentation Proceedings of the ESO Workshop, 139
21. Bowen, I.S., 1938, "The image slicer, a device for reducing loss of light at slit of stellar spectrograph", Ap.J., 88, 113
22. Pierce, A.K., 1965, "Construction of a Bowen Image Slicer", PASP, 77, 216
23. Simmons et al., 1982, "Modified Bowen-Walraven Image Slicer", Proc. SPIE 331, 427
24. Richardson et al., 1984, "Image-slicers", Proc of the IAU Colloquium, 79, 469

25. Weitzel et al., 1996, "3D: the next generation near-infrared imaging spectrometer", A&AS, 119, 531
26. Murphy, T.W., Jr., Matthews, K., Soifer, B.T., 1999, "A cryogenic Integral Field Spectrograph for the Palomar 200 Inch Telescope", PASP, 111, 1176
27. Tecza et al., 2000, "SPIFFI image slicer: revival of image slicing with plane mirrors", Proc. SPIE 4008, 1344
28. Content, R., 1997, "A new design for Integral Field Spectroscopy with 8-m Telescopes", Proc. SPIE 2871, 1295
29. Bonneville, 2002, "La spectroscopie intégrale de champ: Etude et réalisations", Thèse n°02AIX30066
30. Wells, Martyn, Hastings, Peter R., Ramsay-Howat, Suzanne K., 2000, "Design and test of a cryogenic image slicing IFU for UKIRT and NGST", Proc. SPIE 4008, 1215
31. Dubbeldam et al., 2000, "An integral Field Unit for the Gemini Near InfraRed Spectrograph", Proc. SPIE 4008, 1181

Références pour le Tableau 1- 1

- Weitzel et al., 1996, "3D: the next generation near-infrared imaging spectrometer", A&AS, 119, 531
- Murphy, T.W., Jr., Matthews, K., Soifer, B.T., 1999, "A cryogenic Integral Field Spectrograph for the Palomar 200 Inch Telescope", PASP, 111, 1176
- Tecza et al., 2000, "SPIFFI image slicer: revival of image slicing with plane mirrors", Proc. SPIE 4008, 1344
- Glenn et al., 2004, "Design, fabrication, assembly, and testing of the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics (FISICA) integral field unit", Proc. SPIE 5492, 1254
- Dubbeldam et al., 2000, "An integral Field Unit for the Gemini Near InfraRed Spectrograph", Proc. SPIE 4008, 1181
- Thatte et al., 2005, "SWIFT", IFS Workshop à Durham (en prep.)
- Wells, Martyn, Hastings, Peter R., Ramsay-Howat, Suzanne K., 2000, "Design and test of a cryogenic image slicing IFU for UKIRT and NGST", Proc. SPIE 4008, 1215
- McGregor, P.J., Conroy, P., Bloxham, G., Van Harmelen, J., 1999, "Near-infrared Integral Field Spectrograph (NIFS): an instrument proposed for Gemini", PASA, 16, 273
- Doolan et al., 2004, "Optical wavelength image slicer", Proc. SPIE 5492, 421
- Ren, D.; Ge, J., 2004, "An Image Slicer Integral Field Unit with Diffraction-limited Performance for Three-Dimensional Imaging Spectroscopy", PASP 116, 46
- Content et al., 2005, "KMOS", IFS Workshop à Durham (en prep.)
- Cuevas et al., 2005, "FRIDA", IFS Workshop à Durham (en prep.)
- Hénault et al., 2004, "MUSE optomechanical design and performance", Proc. SPIE 5492, 909
- Laurent et al., 2005, "Optical design, manufacturing and tests of the MUSE image slicer", Proc. SPIE 5465 (in press)
- Lee et al., 2004, "Image slicers: design for manufacturability", Proc. SPIE 5494, 176
- Ealet et al., 2003, "SNAP: an integral field spectrograph for supernova identification", Proc. SPIE 4850, 1169
- Prieto et al., 2003, "Great opportunity for NGST-NIRSPEC: a high-resolution integral field unit", Proc. SPIE 4850, 486
- Laurent et al., 2004, "Optical Design, Fabrication and Testing a prototype of the NIRSpec IFU", Proc. SPIE 5252, 443
- Laurent et al., 2004, "Designing, manufacturing and testing of an advanced image slicer prototype for the James Webb Space Telescope", Proc. SPIE 5494, 196

Prieto et al., 2005, “MOMFIS”, IFS Workshop à Durham (en prep.)

Ren et al., 2003, “Image Slicer Integral Field Unit for Solar Telescope”, Proc. SPIE 4853, 551

CHAPITRE 2

MODELISATION OPTIQUE POUR UN DECOUPEUR D'IMAGES

CHAPITRE 2

MODELISATION OPTIQUE POUR UN DECOUPEUR D'IMAGES

1 Introduction

Le chapitre précédent présentait un nouveau concept de spectrographes intégraux de champ à base de découpeurs d'images qui permet d'obtenir une grande compacité des spectres sur le détecteur. Les découpeurs d'images sont apparus à la fin des années 30. Mais ce n'est qu'à la fin du siècle dernier, qu'ils sont appliqués à la spectroscopie 3D. Ils peuvent être composés de miroirs plans ou sphériques fabriqués avec diverses technologies et matériaux suivant les spécificités de l'instrument. Depuis 2002, le nombre de découpeurs d'images devant équiper les futurs instruments a très fortement augmenté, créant une véritable activité mondiale de R&D sur ce thème. Ce chapitre présente les modélisations optiques faites durant ma thèse afin d'améliorer les systèmes découpeurs d'images et de les adapter au mieux aux instruments. Dans un premier temps, le principe du découpeur d'images est décrit en mettant l'accent sur les difficultés majeures de dimensionnement. Ensuite, un calcul des zones dites de blocages dues aux différents angles des slices est présenté. Enfin, une modélisation qui tient compte de la diffraction, des aberrations géométriques et des défauts de surface périodiques est présentée. Elle permettra d'analyser plus profondément les résultats des tests des découpeurs d'images.

2 Caractérisation d'un découpeur d'images

2.1 Principe d'un découpeur d'images

Un découpeur d'images est basé sur un schéma optique comportant deux conjugaisons optiques, l'une sur la pupille du télescope et l'autre sur le plan focal du télescope. Il est composé principalement de deux ou trois éléments optiques:

- le miroir découpeur composé d'un empilement de slices,
- les éléments pupille (miroirs ou lentilles),
- les éléments fente (miroirs ou lentilles).

Dans le cas de deux éléments optiques, une matrice de miroirs secondaires assure le rôle des éléments pupille et fente (Chapitre 5).

La conjugaison « pupillaire » se fait de la manière suivante (Figure 2- 1 à gauche):

- ✓ Chaque miroir composant le miroir découpeur image la pupille du télescope sur son élément pupille (second élément). Chacun de ces miroirs possède des caractéristiques optiques différentes (rayon de courbure, tilt suivant plusieurs directions). Il y a autant d'images de pupilles que de slices. Le plan contenant les images de la pupille du télescope est appelé « plan des pupilles intermédiaires ». La position des pupilles intermédiaires permet de connaître les angles et le rayon de courbure de chaque slice.
- ✓ Les éléments fente (troisième élément) imagent les pupilles intermédiaires sur la pupille d'entrée du spectrographe. Grâce aux caractéristiques des éléments fente

(tilts), toutes les pupilles intermédiaires sont imagées en une pupille unique située, à quelques exceptions près, à l'infini sur la pupille d'entrée du spectrographe (système télécentrique). Le plan contenant la pupille de sortie du découpeur d'images (pupille d'entrée du spectrographe) est appelé « plan de la pupille de sortie ». Les caractéristiques géométriques de la pupille de sortie permettent d'appréhender les erreurs cumulées du miroir découpeur et des éléments fentes.

La « conjugaison champ » se décline en deux étapes (Figure 2- 1 à droite):

- ✓ Une optique d'entrée (« fore optic » en anglais) image le plan focal du télescope sur le miroir découpeur en créant une anamorphose afin de satisfaire le critère d'échantillonnage de Shannon dans la direction spectrale sur le détecteur.
- ✓ Les caractéristiques optiques des éléments pupille permettent d'imager chaque slice contenant une portion rectangulaire du champ sur les éléments fente. Sur ces derniers, on retrouve une série de mini fentes mises bout à bout formant ainsi une pseudo fente qui constitue la fente d'entrée du spectrographe. Le plan contenant les images des slices est appelé « plan de la pseudo fente ». Dans ce dernier plan, les caractéristiques géométriques des mini fentes permettent de valider les spécifications définies sur les éléments pupilles. De plus, une étude de qualité d'image (Point Spread Function – PSF) est réalisée dans ce plan.

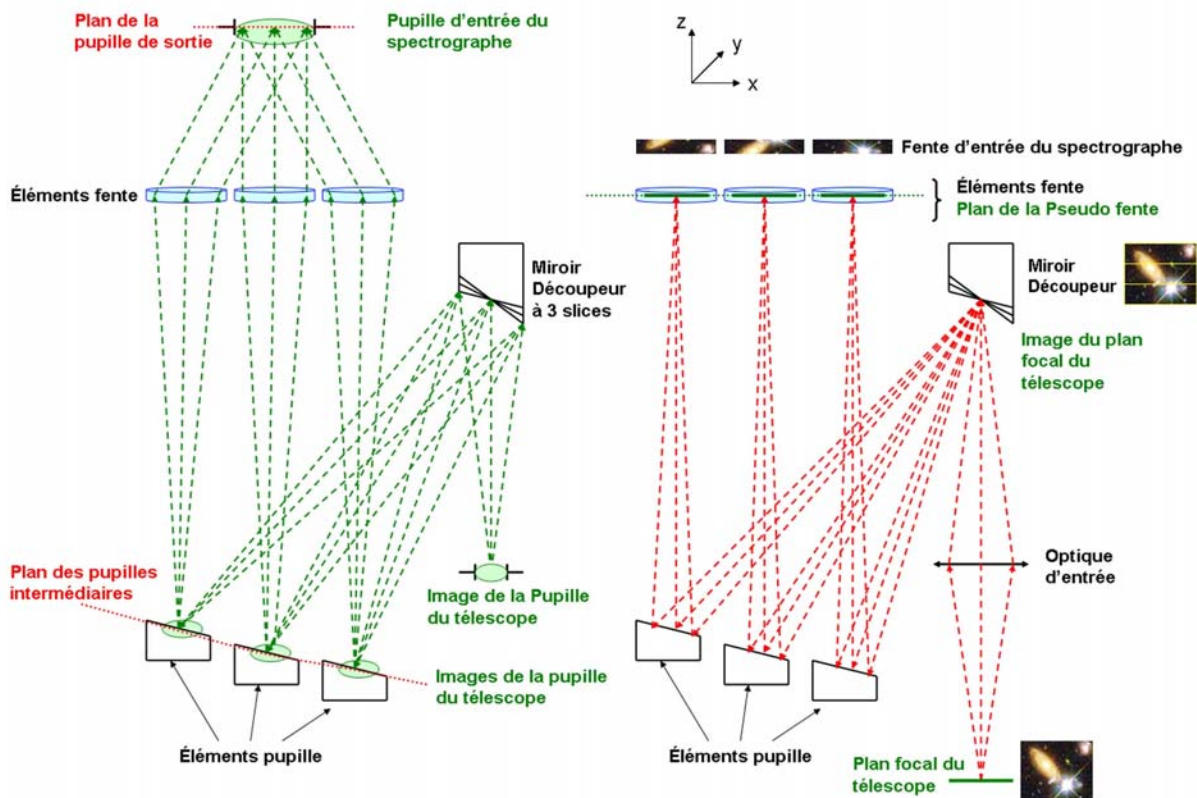


Figure 2- 1: Principe du découpeur d'images. A gauche : Conjugaison « pupillaire ». A droite : Conjugaison « champ ».

Par convention :

- L'axe x est la direction parallèle à la longueur d'une slice, c'est la direction perpendiculaire à la dispersion sur le détecteur.

- L'axe y est la direction perpendiculaire à la longueur d'une slice, c'est la direction de dispersion sur le détecteur.
- L'axe z représente l'axe optique principal. Il complète le trièdre direct donné par les axes x et y précédemment définis.
- Le découpeur d'images désigne l'ensemble du système optique (miroir découpeur, éléments pupille et éléments fente),
- Le miroir découpeur est un empilement de slices,
- Une slice est un miroir dont la surface active est située sur la tranche,
- Les éléments pupille et fente sont des miroirs ou des lentilles.

2.2 Caractéristiques des éléments individuels

2.2.1 Le miroir découpeur

Le miroir découpeur est la pièce maîtresse du système découpeur d'images. Il représente un réel défi technologique lors de sa fabrication et de son assemblage. En effet, chaque slice a sa surface active sur la tranche du miroir, dont l'épaisseur est variable autour de 1 mm. Sur cette tranche, une surface sphérique dont le centre de courbure est décalé dans les deux directions x et y est polie (Figure 2- 2). Chaque slice a ses propres tilts et rayons de courbure avec des fortes tolérances. Les chapitres suivants montrent quelques optimisations qui peuvent être apportées aux caractéristiques des slices en accord avec les spécifications de haut niveau et les contraintes de fabrication. Les slices sont assemblées entre elles afin de former un miroir découpeur. Plusieurs techniques d'assemblage sont utilisées. Pour les miroirs découpeurs en verre, l'adhérence moléculaire apporte une précision d'assemblage inégalée (Chapitre 3 et 4).

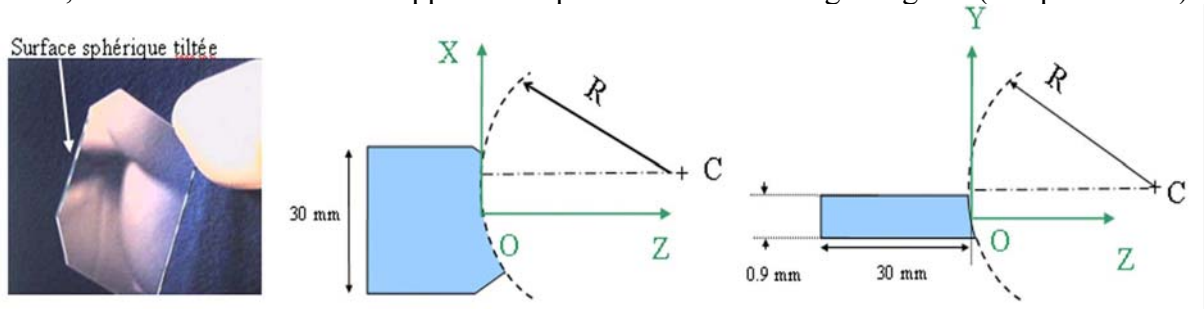


Figure 2- 2 : Caractéristiques optiques d'une slice. De gauche à droite : Visualisation de la surface active, Tilt suivant la direction x, Tilt suivant la direction y.

2.2.2 Les éléments pupille et fente

Les éléments pupille ont une forme rectangulaire épousant la forme de la pupille et sont positionnés les uns à côté des autres. Contrairement au miroir découpeur, le design optique permet de laisser des espaces de quelques dixièmes de millimètres entre les éléments. L'assemblage peut se faire par adhérence moléculaire, mécaniquement ou par collage. Ils ont, en général, une surface active sphérique tiltée dans les deux directions x et y et des rayons de courbure différents. Géométriquement et optiquement, les éléments fente ressemblent très fortement aux éléments pupille. Suivant les spécificités de l'instrument, les éléments pupilles et fentes sont soit des miroirs, soit des mini lentilles. Dans certains cas, les fonctionnalités des éléments pupille et fente sont données par une seule matrice de miroirs secondaires (Chapitre 5). De plus, pour améliorer les performances optiques de l'instrument, d'autres éléments tels que des lentilles de champ peuvent être insérées.

2.3 Optimisation d'un découpeur d'images

Dans un premier temps, lorsqu'on dessine un découpeur d'images à l'aide d'un logiciel de tracé de rayons (tel que Zemax), les performances optiques de haut niveau doivent être respectées (qualité image, nombre d'ouverture, dimensionnement...). Une fois que cela est réalisé, le but est de simplifier le design afin de rendre la fabrication, l'assemblage et les tests plus aisés, tout en respectant les spécifications. Quelques exemples d'optimisations possibles sur les caractéristiques d'un découpeur d'images sont :

- Symétriser les tilts (nombre pair de slices). Ceci permet de placer plusieurs éléments sous la sphère de polissage lors de la fabrication,
- Dessiner un tilt suivant une seule direction,
- Rendre les rayons de courbure identiques, totalement ou par lots,
- Décaler chaque élément suivant l'axe z,
- Séparer les éléments en lots identiques,
- Remplacer des miroirs par des lentilles et vice versa,
- Créer un miroir découpeur avec des slices planes tiltées avec ajout d'un doublet qui permet de remplir la fonction de grandissement du miroir découpeur.

L'optimisation des paramètres est un facteur clé qui conditionne le coût, la facilité et la rapidité de la fabrication.

2.4 Méthodologie de tests

En général, pour caractériser un découpeur d'images, on contrôle individuellement tous les éléments optiques à l'aide d'instruments de métrologie tels que l'interféromètre, le profilomètre, le microscope électronique ou le rugosimètre. Une fois ces éléments contrôlés, le découpeur d'images est assemblé étape par étape en fonction des différents plans observés, en suivant la logique de la double conjugaison pupille-champ (§ 2.1).

Plusieurs séries de mesures sont faites dans les plans suivants :

- Plan des pupilles intermédiaires (découpeur d'images constitué seulement par le miroir découpeur).
- Plan de la pseudo fente (miroir découpeur et éléments pupille).
- Plan de la pupille de sortie (tous les éléments composant le découpeur d'images sont présents sur le banc de tests).

Cette méthodologie de tests à laquelle s'ajoute quelques variantes est en général adoptée pour tous les tests des découpeurs d'images effectués au CRAL.

3 Calcul des zones de blocages sur un découpeur d'images

Lors des phases de pré-design, il est intéressant de pouvoir comparer plusieurs systèmes découpeurs d'images pour un même projet. Le calcul des zones de blocages sur le miroir découpeur peut être un facteur déterminant puisqu'il est en général noté dans les spécifications de haut niveau d'un instrument (Fill factor <1). En effet, les zones de blocages correspondent à des zones perdues dans le champ du télescope. Le choix de développer un programme indépendant implémenté en Tcl/Tk et C++ [1] permet un gain de temps de calcul par rapport à Zemax. En effet, sous Zemax, le miroir découpeur est créé en objet non séquentiel puis une macro lance de multiples rayons incidents. Les calculs avec des objets non séquentiels sont très coûteux en temps.

Comme cité dans le paragraphe 2, un découpeur d'images est composé d'un empilement de slices qui sont décalées (tiltées) les unes par rapport aux autres. Il existe alors une surface plane entre chaque slice qui bloque les faisceaux réfléchis (Figure 2- 3).

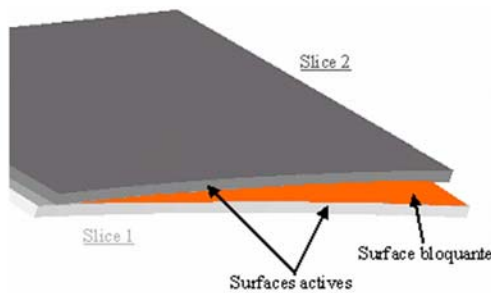


Figure 2- 3 : Définition des surfaces bloquantes et actives

Un premier programme permet de créer un fichier texte contenant les caractéristiques d'ensemble du miroir découpeur telles que :

- Le nombre de slices,
- La dimension du miroir découpeur,
- La distance entre la pupille et le centre du miroir découpeur,
- Les dimensions de la pupille elliptique,
- L'angle d'incidence du faisceau par rapport au centre du miroir découpeur.

Puis, pour chaque slice, les caractéristiques individuelles sont entrées telles que :

- Les coordonnées de chaque slice par rapport au repère du miroir découpeur,
- Le rayon de courbure de chaque slice,
- Les coordonnées du centre de la sphère.

Un second programme simule un tracé de rayons sur le miroir découpeur afin de déterminer le pourcentage de rayons perdus. Chaque rayon envoyé de la pupille d'entrée vers un point du miroir découpeur est analysé: s'il ne touche pas la surface active, il est comptabilisé comme rayon perdu. Une interface homme-machine simplifie l'utilisation de ces programmes.

Cette modélisation des zones de blocages sur un découpeur d'images est détaillée dans l'Annexe 1. Le programme ainsi que les résultats sur différents miroirs découpeurs de formes différentes y sont présentés.

4 Simulation en tenant compte de la diffraction, des aberrations géométriques et des états de surface

Ce paragraphe a pour but de fournir une simulation complète d'un découpeur d'images en tenant compte des trois paramètres optiques suivants:

- La diffraction,
- Les aberrations géométriques,
- L'état de surface.

Comme présenté au paragraphe 2.1, cette simulation est scindée en 2 programmes simulant la conjugaison « pupillaire » et la conjugaison « champ ». Les résultats concernant tous les différents plans du système découpeur d'images (« plan des pupilles intermédiaires », « plan de la pseudo fente » et « plan de la pupille de sortie ») sont accessibles à partir de la simulation. Cette dernière donne un outil de comparaison avec les résultats des tests effectués au laboratoire sur les systèmes découpeurs d'images (Chapitre 3, 4 et 5).

Cette simulation utilise le logiciel de traitement d'images IDL. Ce choix de développer notre propre outil permet d'introduire les aberrations géométriques du système calculées par Zemax et d'introduire les défauts de surface mesurés à l'aide d'un rugosimètre. Il présente l'avantage d'être rapide et modulaire, en ayant accès à tous les plans du système.

Le logiciel de tracé de rayons Zemax traite le phénomène de diffraction grâce à son module « Physical Optical Propagation ». De plus, il permet d'introduire des surfaces avec des défauts périodiques. La Figure 2- 4 représente la PSF donnée par un système découpeur d'images. Une fonction périodique dont l'amplitude PTV (Peak To Valley) est de 20 nm avec une période de 20 μm a été introduite sur l'élément pupille aussi bien dans Zemax que dans la simulation IDL. Le profil d'éclairement de la PSF donnée par Zemax ne correspond pas au formalisme de l'Optique de Fourier. De plus, l'échantillonnage proposé par Zemax est insuffisant créant des incohérences majeures sur le profil d'éclairement dans le plan image (Figure 2- 4 à gauche). En revanche, la PSF donnée par le modèle IDL répond à l'Optique de Fourier ainsi qu'à la théorie de l'échantillonnage (Figure 2- 4 à droite).

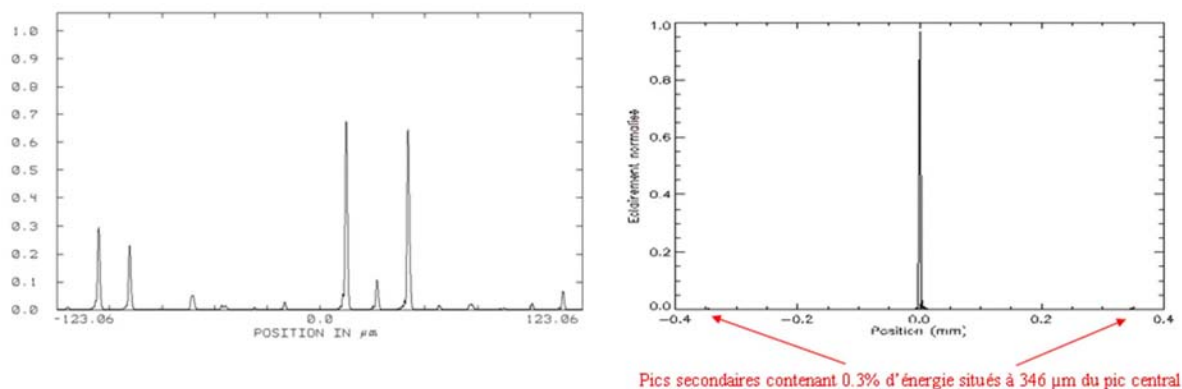


Figure 2- 4 : Coupe suivant l'axe x de la PSF d'un système découpeur d'images dont l'élément pupille est une fonction périodique d'amplitude PTV de 20 nm avec une période de 20 μm . A gauche : Résultats donnés par Zemax. A droite : Résultats donnés par la simulation IDL.

Les paragraphes suivants présentent quelques rappels sur l'Optique de Fourier et sur la théorie de l'échantillonnage, puis sur le principe de fonctionnement et les résultats du modèle numérique sous IDL.

4.1 Optique de Fourier

Ce paragraphe résume les bases fondamentales de l'étude de la diffraction, laquelle joue un rôle essentiel dans la formation des images ([2] et [3]).

4.1.1 Principe de Huygens-Fresnel

L'origine de la diffraction est la nature ondulatoire de la lumière et pour l'aborder il faut donc en théorie remonter à l'équation d'onde. Le principe de Huygens-Fresnel est une approximation de la solution rigoureuse au problème de diffraction donnée par la résolution de l'équation d'onde. Il est valable dans le cadre de l'approximation paraxiale : c'est à dire quand la distance entre l'objet et la figure de diffraction est grande devant à la fois la taille de l'objet et la taille de la figure de diffraction. Ce principe de Huygens-Fresnel est basé sur l'idée que la lumière se propage de proche en proche. L'ensemble des points d'égale perturbation lumineuse est appelé surface d'onde. Chacun des points de cette surface atteinte par la lumière

se comporte comme une source secondaire qui émet des ondelettes sphériques dans un milieu isotrope. La surface enveloppe de ces ondelettes forme une nouvelle surface d'onde.

On considère une ouverture (Σ) contenue dans le plan $z = 0$ (Figure 2- 5). L'amplitude de l'onde incidente en un point P_1 quelconque de l'ouverture, de coordonnées (ξ, η) est notée $U(P_1)$. Lorsque l'onde arrive au point d'observation P_0 de coordonnées (x, y) à une distance z du plan objet, cette onde a pour amplitude, en notation complexe :

$$U(x, y) = U(P_0) = \frac{z}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U(\xi, \eta) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}^2} d\xi d\eta \quad \text{avec } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Équation 1 : Amplitude de l'onde au point P_0

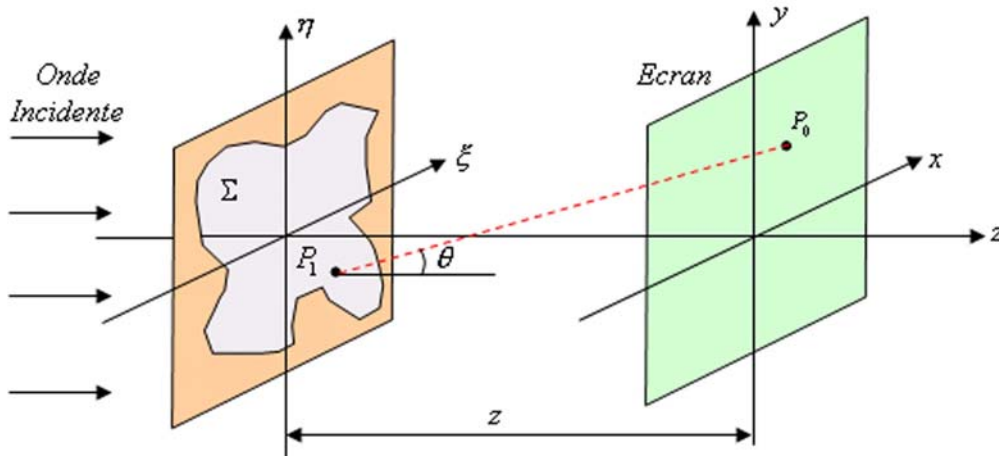


Figure 2- 5 : Schéma illustrant les notations utilisées pour le principe de Huygens-Fresnel

4.1.2 Facteur de transmission

Les objets diffractants ne sont pas forcément des ouvertures laissant passer 100% de l'onde au niveau de l'ouverture et rien à côté. On peut introduire un facteur de transmission, $t(P) = t(\xi, \eta)$ d'un objet diffractant qui est le rapport entre l'amplitude de l'onde juste après l'objet avec celle de l'onde juste avant l'objet.

4.1.3 Diffraction de Fresnel

Dans les conditions usuelles d'observations, les tailles de l'ouverture et du phénomène de diffraction observé sont petites devant la distance z d'observation. On a :

$$r_{01} = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$$

On peut donc utiliser un développement limité pour écrire:

$$r_{01} \cong z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x - \xi}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y - \eta}{z} \right)^2 \right]$$

En remplaçant r_{01} par cette expression dans l'Équation 1, on obtient alors :

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{jkz} \iint_{\Sigma} U(\xi, \eta) \exp \left[j \frac{k}{2z} \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right] \right] d\xi d\eta$$

Équation 2 : Amplitude avec l'approximation de Fresnel dans le plan d'observation

L'Équation 2 peut se développer sous la forme suivante :

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{jkz} \exp\left(j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right) \iint_{\Sigma} \left\{ U(\xi, \eta) \exp\left[j \frac{k}{2z} [\xi^2 + \eta^2]\right] \right\} \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} [x\xi + y\eta]\right] d\xi d\eta$$

Équation 3 : Amplitude « développée » pour l'approximation de Fresnel dans le plan d'observation

Cette intégrale est appelée transformation de Fresnel et permet de déterminer la figure de diffraction observée à distance finie de l'ouverture diffractante.

De plus, l'Équation 2 est vue comme un produit de convolution, exprimable sous la forme :

$$U(x, y) = \iint_{\Sigma} U(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad \text{où } h(x, y) = \frac{e^{jkz}}{jkz} \exp\left[j \frac{\pi}{2z} [x^2 + y^2]\right]$$

Équation 4 : Transformation de Fresnel exprimée par un produit de convolution

4.1.4 Diffraction de Fraunhofer

La diffraction de Fraunhofer ou diffraction à l'infini est un cas particulier de la diffraction de Fresnel où le plan d'observation est situé loin de l'objet diffractant, celui-ci étant éclairée par une onde plane (source ponctuelle à l'infini). On supposera ici que la source est située sur l'axe du système et donc que $U(x, y)$ est constant dans le plan diffractant.

Si $z \gg \frac{k(\xi^2 + \eta^2)_{\max}}{2}$, on peut alors écrire d'après l'Équation 3 :

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{jkz} \exp\left(j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right) \iint_{\Sigma} U(\xi, \eta) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} [x\xi + y\eta]\right] d\xi d\eta$$

Équation 5 : Onde diffractée dans les conditions de Fraunhofer

On remarque que l'amplitude diffractée est proportionnelle à la transformée de Fourier de l'onde incidente $U(\xi, \eta)$ au niveau de l'ouverture.

$$U(x, y) = K'' \mathcal{TF}_{f_x, f_y} [U(\xi, \eta)]$$

Équation 6 : Amplitude diffractée exprimée à l'aide d'une transformée de Fourier

où $f_x = \frac{x}{\lambda z}$ et $f_y = \frac{y}{\lambda z}$ sont les fréquences spatiales et $K'' = \frac{e^{jkz}}{jkz} \exp\left(j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right)$

4.1.5 Eclairage cohérent et incohérent

Lors de la formation des images, l'influence de la diffraction peut se limiter à deux cas limites simples et importants, les objets parfaitement cohérents et parfaitement incohérents. Lorsque l'objet est cohérent, ses différents points émettent des ondes qui présentent entre elles une relation stationnaire ; il en est ainsi lorsqu'on éclaire un objet à l'aide d'une onde plane ou sphérique. En raison de cette cohérence, les amplitudes complexes des ondes émises par ses différents points s'ajoutent, mais pas les intensités. Lorsque l'objet est incohérent, ses différents points émettent des ondes qui ne présentent entre elles aucune relation stationnaire. Par exemple, les objets de l'astronomie et plus généralement les corps lumineux par eux-mêmes sont des objets incohérents. Dans ce cas, les intensités s'ajoutent.

Dans la simulation suivante, nous nous placerons dans le cas d'objets incohérents.

4.1.6 Formation des images : Action d'une lentille sur une onde optique

En pratique, observer à l'infini signifie être assez loin de l'objet diffractant ce qui revient à dans le cas de l'optique, se placer au foyer image d'une lentille mince paraxiale. Une lentille ou un système optique agit comme un transformateur de phase. En effet, l'amplitude de l'onde juste après une lentille s'écrit :

$$U_l(x, y) = \exp\left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2)\right] \quad \text{où } f \text{ est la distance focale de la lentille}$$

Équation 7 : Amplitude d'une onde juste derrière une lentille

4.1.7 Action de la diffraction sur la formation des images

La conjugaison des phénomènes de propagation dans les conditions de Fraunhofer (Équation 5) et l'action d'une lentille (Équation 7) permettent de montrer que la réponse impulsionnelle à travers un système s'écrit sous la forme :

$$h(u, v; \xi, \eta) = \frac{1}{\lambda z_i} \iint_{\Sigma} P(x, y) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda z_i} [(u - \gamma\xi)x + (v - \gamma\eta)y]\right\} dx dy$$

Équation 8 : Réponse impulsionnelle à travers un système optique

Où $P(x, y)$ représente la fonction pupillaire qui vaut 1 à l'intérieur de l'ouverture et 0 ailleurs.

γ : Le grandissement du système

z_i : La distance de la pupille au plan image

Un objet dont l'amplitude est exprimée par la fonction $U_o(\xi, \eta)$ donne une image à travers un système imageur dont l'amplitude est $U_i(u, v)$ (Figure 2- 6).

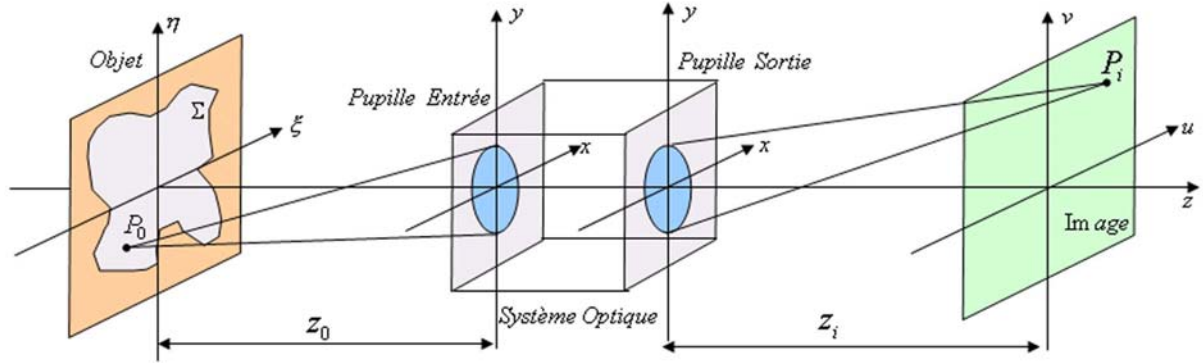


Figure 2- 6 : Schéma illustrant les notations utilisées pour l'action de la diffraction sur la formation des images

L'amplitude de l'image est donnée par l'expression suivante :

$$U_i(u, v) = [U_g(\xi', \eta') \otimes_{u, v} h(\xi', \eta')]$$

Équation 9 : Amplitude de l'onde diffractée dans le plan image d'un système optique

Expression dans laquelle $U_g(\xi', \eta')$ est l'amplitude de l'image « géométrique » de l'objet c'est-à-dire une copie de l'objet au grandissement γ près – les variables $\xi' = \gamma\xi$ et $\eta' = \gamma\eta$ prennent en compte l'homothétie induite par le grandissement. Le terme $h(\xi', \eta')$ est la

réponse impulsionnelle du système et revêt une importance particulière puisqu'il traduit l'influence du système sur la formation des images et est défini par l'Équation 8. De plus, la PSF est définie à l'aide de la réponse impulsionnelle comme telle :

$$PSF = |h(\xi', \eta')|^2$$

Équation 10 : Expression de la PSF

En éclairage incohérent, il convient de raisonner sur les intensités et non plus sur les amplitudes. De cette manière, l'intensité de l'image réelle est liée à l'intensité de l'image géométrique $I_g(\xi', \eta') = |U_g(\xi', \eta')|^2$ et à la réponse impulsionnelle $h(\xi', \eta')$ du système par la relation de la forme :

$$I_i(u, v) = |h(\xi', \eta')|^2 \bigotimes_{xi, yi} I_g(\xi', \eta') = PSF \bigotimes_{xi, yi} I_g(\xi', \eta')$$

Équation 11 : Intensité de l'image réelle

4.1.8 Aberrations géométriques et état de surface

Un terme de phase supplémentaire traduit les défauts d'aberrations ou de mise au point du système. Ce terme de phase agit dans l'Équation 8 au niveau de la fonction pupillaire comme suit :

$$p(x, y) = P(x, y) \cdot \exp[jkW(x, y)] \quad \text{où } W(x, y) = W_1(x, y) + W_2(x, y)$$

Équation 12 : Influence des aberrations géométriques dans la réponse impulsionnelle

Le terme $W_1(x, y)$ représente l'écart entre la surface d'onde idéale sphérique et la surface d'onde réelle. Dans la simulation, ce terme est représenté par la matrice N×N d'erreurs de front d'onde du système étudié donnée par Zemax dans le plan image.

Le terme $W_2(x, y)$ introduit un état de surface représentant la fonction « cosinus » avec une amplitude notée « a » et une période définie « p » exprimé sous la forme

$$W_2(x, y) = a \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right).$$

4.2 Théorie de l'échantillonnage

La théorie de l'échantillonnage permet de coder correctement un système faisant appel à des transformées de Fourier [4].

4.2.1 La transformée de Fourier discrète

La transformée de Fourier discrète (TFD) est un outil mathématique de traitement du signal, qui est l'équivalent discret de la transformée de Fourier utilisée pour des calculs numériques. La relation entre la fonction $f(x)$ à traiter et la fonction échantillonnée correspondante $f_e(x)$ peut être écrite de la manière suivante :

$$f_e(x) = f(n\Delta x) = f(x) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n\Delta x) \quad n \text{ étant un entier relatif}$$

Ainsi seules les valeurs de $f(x)$ correspondant à $x = n\Delta x$ sont considérées. On comprend intuitivement que la fonction échantillonnée $f_e(x)$ représentera d'autant mieux le signal que le pas Δx est faible.

On applique la transformée de Fourier à la fonction échantillonnée qui s'écrit sous la forme :

$$F_e(u) = TF[f(x)] \otimes \frac{1}{\Delta x} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(x - \frac{n}{\Delta x}\right)$$

On obtient une fonction périodique de période $1/\Delta x$ avec une fréquence maximale notée U_{\max} .

La Figure 2- 7 illustre les notations précédentes.

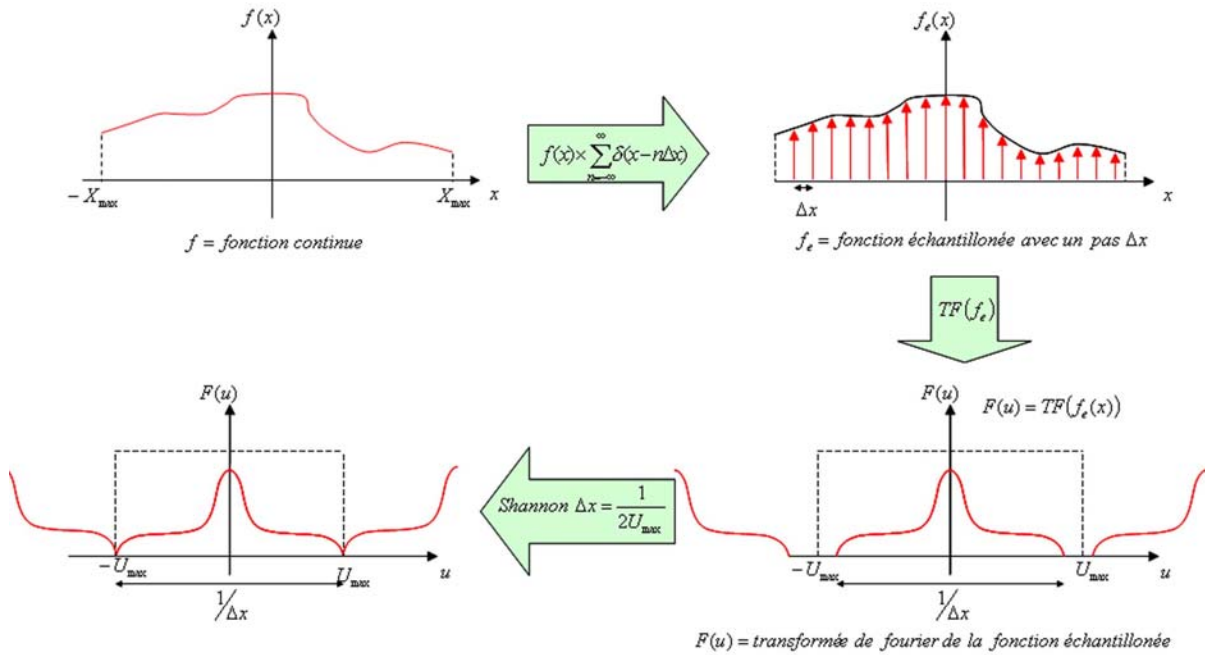


Figure 2- 7 : Schéma illustrant les notations pour la théorie d'échantillonnage

4.2.2 Critère de Shannon

Cependant, il n'est pas nécessaire que Δx soit plus petit que les détails les plus fins du signal, lesquels correspondant à la fréquence maximale U_{\max} , au-delà de laquelle on peut négliger le spectre. L'échantillonnage restitue toute l'information utile pourvu que :

$$\Delta x \leq \frac{1}{2U_{\max}}$$

Autrement dit, il faut que la fréquence d'échantillonnage $1/\Delta x$ soit au moins égale à 2 fois la fréquence maximale U_{\max} contenue dans le spectre de ce signal.

Si la condition de Shannon n'est pas respectée, les spectres du signal se recouvrent et donc s'altèrent mutuellement. On parle de repliement ou recouvrement de spectre qui provoque une perte d'information dans le signal étudié.

Pour revenir dans l'espace temporel suivant, on applique la théorie d'échantillonnage précédemment citée. Ainsi, le critère de Shannon s'écrit:

$$\frac{1}{\Delta u} \geq 2X_{\max} = N \cdot \Delta x$$

La théorie de l'échantillonnage ci-dessus est présentée pour une dimension (1D) mais se généralise très facilement à l'espace à deux dimensions (2D) où les intervalles d'échantillonnage sont donnés par :

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x} \text{ et } \Delta v = \frac{1}{N\Delta y}$$

Équation 13 : Relation d'échantillonnage entre un plan objet et image

4.2.3 Méthode du « zero padding »

Dans la formule précédente, l'augmentation de Δx permet de diminuer l'intervalle entre deux fréquences et donc d'augmenter la résolution spectrale. Ceci revient à immerger l'objet dans une matrice de zéros. Cette méthode est appelée « méthode du zero padding ». Pour la simulation présentée, on choisira une matrice d'entrée contenant autant de « 1 » que de « 0 ».

4.2.4 La transformée de Fourier rapide

La Transformée de Fourier rapide (acronyme anglais : FFT ou Fast Fourier Transform) est un algorithme de calcul de la TFD. Le temps de calcul de l'algorithme rapide peut être 100 fois plus court que le calcul utilisant la formule de définition de la TFD. L'algorithme de Cooley-Tukey est un algorithme fréquemment utilisé pour calculer la transformation de Fourier rapide. Cet algorithme sera utilisé lors de la modélisation.

4.2.5 Applications de la théorie d'échantillonnage pour le calcul d'une transformée de Fourier

La Figure 2- 8 illustre les notations de l'application de la théorie de l'échantillonnage pour le calcul d'une transformée de Fourier lors de la formation des images (§ 4.1.7).

En combinant les formules de l'échantillonnage de l'Équation 13: $\Delta x = \Delta y = \frac{T_{MObjet}}{N}$ et

$\Delta u = \Delta v = \frac{1}{N\Delta x} = \frac{1}{T_{MObjet}}$ et celles de la théorie de la diffraction concernant les fréquences

spatiales : $\Delta u = \Delta v = \frac{\Delta x_i}{\lambda f} = \frac{\Delta y_i}{\lambda f}$, on obtient la relation suivante qui fait passer du plan objet

au plan image : $T_{MObjet} = \frac{N\lambda f}{T_{MImage}}$

Équation 14 : Formule faisant passer du plan objet au plan image

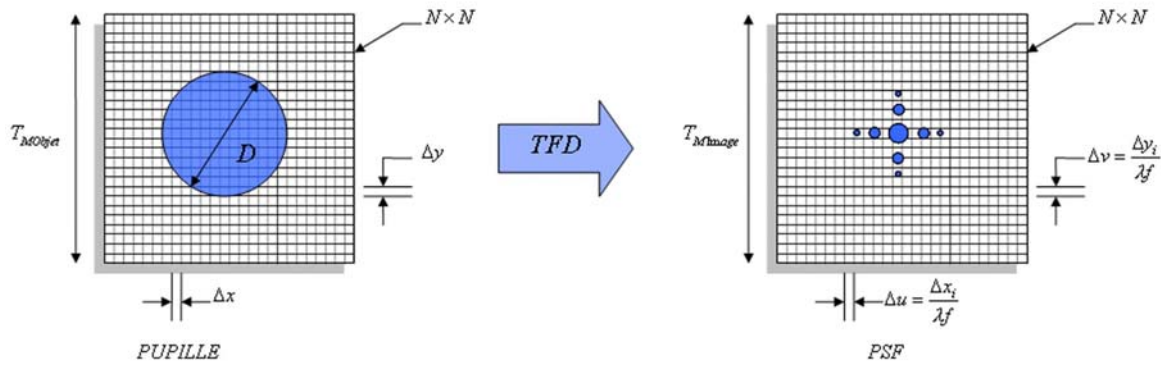


Figure 2- 8 : Schéma illustrant les notations pour l'échantillonnage afin de déterminer l'échelle dans le plan image.

4.3 Principe de fonctionnement de la simulation

Cette modélisation qui tient compte de la diffraction, des aberrations géométriques et des états des surfaces se décompose en 2 sous simulations ([5] et [6]):

- Une représentant la conjugaison « pupillaire »
- L'autre représentant la conjugaison « champ » (§ 2.1).

Bien que la simulation de la conjugaison « champ » soit représentative du système découpeur d'images, la modélisation sur la conjugaison « pupillaire » apporte des compléments intéressants dans le « plan des pupilles intermédiaires » et celui de « la pupille de sortie » afin de confronter les résultats à ceux des tests obtenus en laboratoire. Ces deux modélisations permettent de suivre la méthodologie de tests présentée au paragraphe 2.4 et de comparer les répartitions d'éclairement mesurées au laboratoire à celles modélisées. Ces simulations doivent s'adapter à un grand nombre de système découpeur d'images dans la limite du respect du critère de Shannon (§ 4.2.2). Dans le cadre de cette thèse, les simulations s'appliquent à tous les prototypes testés à l'Observatoire de Lyon.

Néanmoins, ces modélisations présentent les approximations suivantes :

- On utilise l'approximation de Fraunhofer qui est justifié car le système découpeur d'images propose des conjugaisons infini foyer ou entre plans conjugués (§ 4.1.4),
- L'algorithme de « Transformée de Fourier Rapide » est utilisé (§ 4.2.4),
- La simulation s'appuie sur le formalisme de formation des images en éclairage incohérent en lumière monochromatique (§ 4.1.5),
- Les PSF sont identiques sur l'ensemble du champ (isoplanétisme),
- Le modèle est mono configuration; il traite qu'un ensemble slice, élément pupille et élément fente à la fois,
- Le modèle n'introduit pas les défauts d'une optique d'entrée et du télescope lui-même, car ceux-ci ne sont pas disponibles lors de la caractérisation des prototypes. En revanche, ceci serait facile à implémenter,
- Le modèle ne permet pas d'introduire des défauts du type « rugosité », c'est-à-dire inférieurs à $\lambda/100$ et des défauts périodiques ayant une courte période ($< 15\mu\text{m}$).

Ces approximations permettent à ce modèle d'être simple d'utilisation et assez rapide (calcul inférieur à 5 minutes) afin de faire une comparaison avec les résultats des tests au laboratoire.

4.3.1 Simulation dans le plan « champ »

Le programme de simulation dans le « plan champ » est associé à une feuille de données où sont inscrits les paramètres d'entrée de la simulation qui sont les suivants :

- La longueur d'onde,
- Le diamètre suivant x et y de la pupille du télescope,
- La distance entre la pupille du télescope et la slice,
- Les dimensions suivant x et y d'une slice,
- La distance entre la slice et l'élément pupille,
- Les dimensions suivant x et y de l'élément pupille,
- La distance entre l'élément pupille et l'élément fente,
- Le défaut périodique de surface sur l'élément pupille,
- La carte d'erreurs de front d'onde donnée par Zemax (fichier texte),
- Les dimensions suivant x et y de l'élément fente.

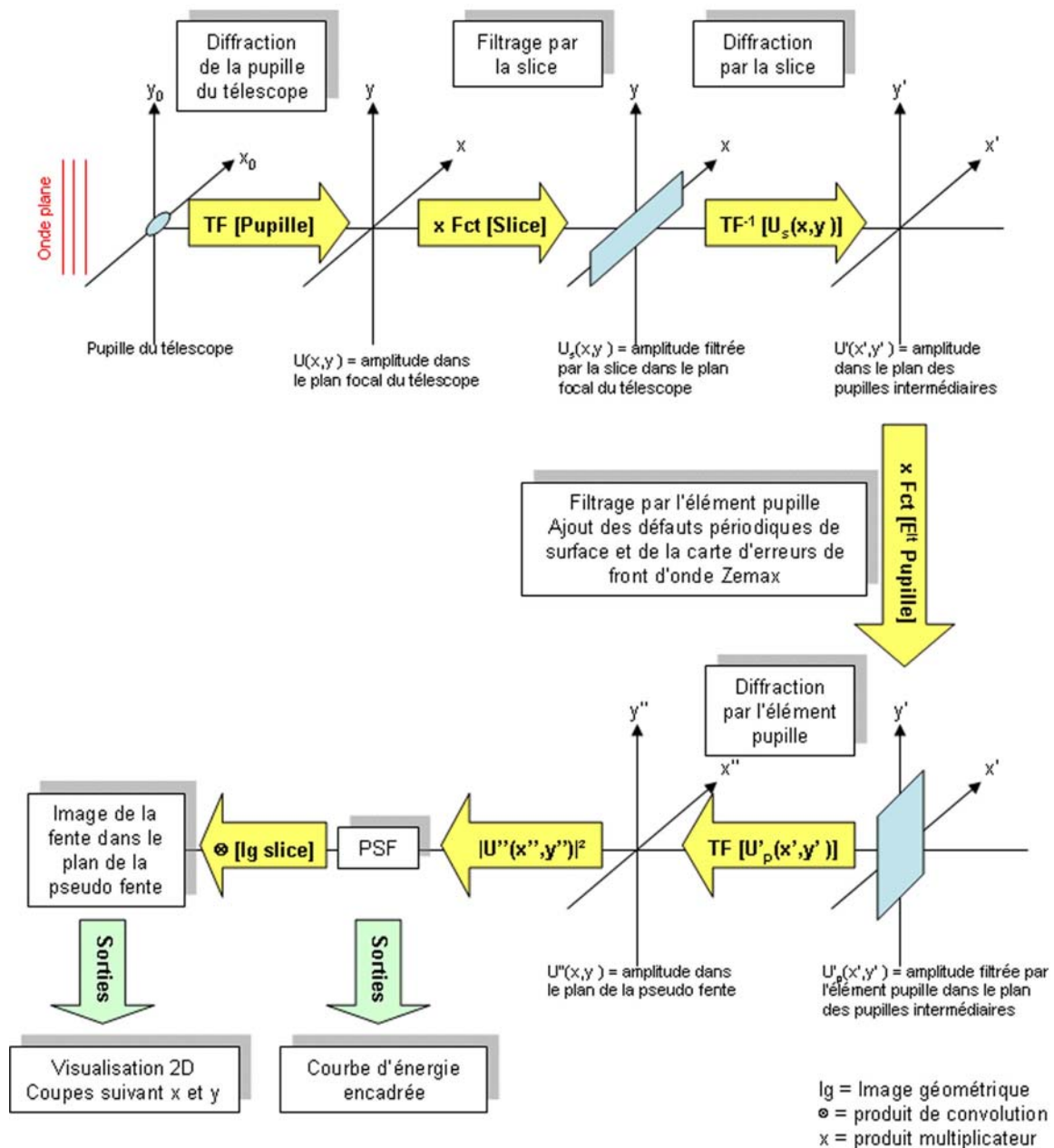


Figure 2- 9 : Principe de modélisation dans le plan du champ

Le diagramme de fonctionnement de la simulation est présenté sur la Figure 2- 9. Une matrice contenant la pupille du télescope est créée. Pour calculer les effets de la diffraction, on fait une transformée de Fourier de cette pupille (Équation 6). Le résultat est filtré par une matrice contenant la surface de la slice. Pour réobtenir l'amplitude complexe dans le plan des pupilles intermédiaires, une transformée de Fourier inverse est appliquée. Cette amplitude est alors filtrée par une matrice contenant les dimensions de l'élément pupille auxquelles sont ajoutées les défauts de surface et la carte d'erreurs de front d'onde (Équation 12). En faisant une dernière transformée de Fourier au travers de l'élément pupille et en prenant le module au carré du résultat, on obtient la PSF dans le plan de la pseudo fente. Ensuite, cette matrice PSF est convoluée avec une matrice décrivant l'image géométrique de la slice (Équation 11). Ainsi, on obtient l'image réelle de la slice dans le plan de la pseudo fente.

Cette simulation donne les paramètres de sorties suivants :

- La PSF en 2D dans le plan de la pseudo fente qui peut être zoomée ou rééchantillonnée,
- Les coupes suivant les axes x et y de la PSF,
- La courbe d'énergie encadrée de la PSF,
- L'image réelle en 2D que l'on obtient dans le plan de la pseudo fente, ainsi que les coupes suivant les axes x et y.

En définitive, les matrices contenant la PSF et l'image réelle sont archivées. Il est alors possible d'écrire des modules IDL permettant de faire des traitements adéquats sur ces matrices.

4.3.2 Simulation dans le plan pupillaire

Les paramètres d'entrée sont identiques à ceux de la simulation dans le plan champ à la différence qu'on introduit le défaut de surface et la carte d'erreurs de front d'onde sur la slice ainsi que sur l'élément fente, au lieu de l'introduire sur l'élément pupille. De plus, les paramètres d'entrée incluent aussi la distance entre l'élément fente et le plan de la pupille de sortie, et les dimensions suivant x et y de cette dernière.

Le schéma de fonctionnement est décrit sur la Figure 2- 10. Ce schéma se décompose en deux sous-programmes (un avec une visualisation dans le plan des pupilles intermédiaires et l'autre dans le plan de la pupille de sortie).

En effet, une matrice contenant les dimensions de la slice avec les défauts de surface et la carte d'erreurs de front d'onde est créée. On applique une transformée de Fourier afin de simuler le plan des pupilles intermédiaires, pour obtenir la PSF et l'image réelle de la pupille du télescope. Ensuite, pour la visualisation dans le plan de la pupille de sortie, le résultat de la transformée de Fourier de la slice (sans la carte d'erreurs de front d'onde au niveau du plan des pupilles intermédiaires) est filtré par une matrice contenant les caractéristiques de l'élément pupille. L'amplitude complexe dans le plan de la pseudo fente est obtenue en appliquant une transformée de Fourier inverse. Cette amplitude est alors filtrée par une matrice contenant les dimensions de l'élément fente auxquelles sont ajoutés les défauts de surface et la carte d'erreurs de front d'onde. Une dernière transformée de Fourier permet de passer dans le plan de la pupille de sortie et de calculer ainsi la PSF puis l'image réelle de la pupille de sortie.

Comme pour la simulation dans le plan champ, on peut visualiser :

- La PSF dans le plan de la pupille intermédiaire et dans le plan de la pupille de sortie sous différentes formes (2D, coupes, courbe d'énergie encadrée...),
- L'image réelle dans les deux plans pupillaires.

Là encore, les matrices contenant la PSF et les images réelles des différentes pupilles sont stockées afin de créer des outils de visualisation et de calculs.

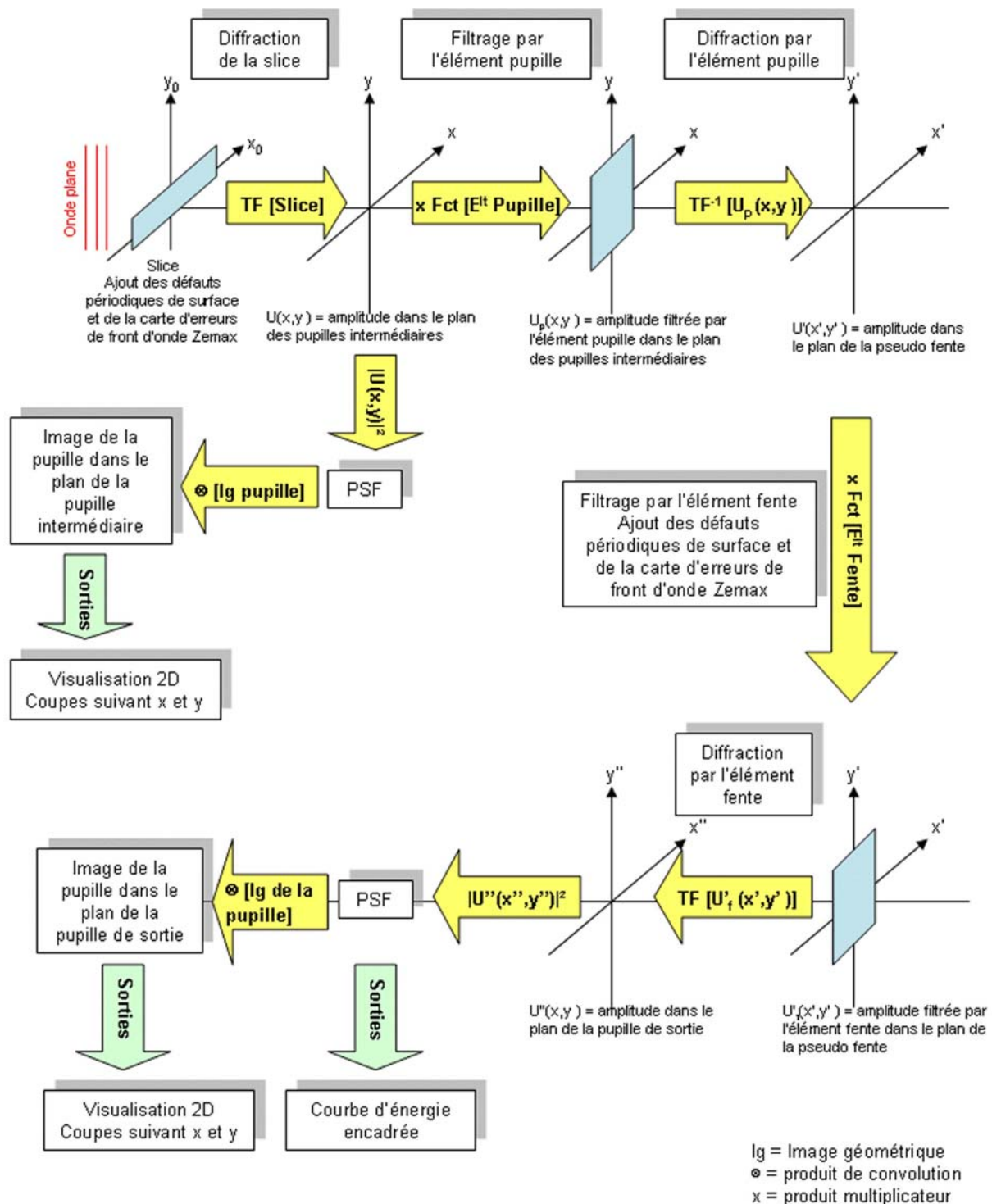


Figure 2- 10 : Principe de modélisation dans le plan pupillaire

Ces deux modélisations complémentaires permettent de visualiser tous les plans intermédiaires d'un système découpeur d'images afin qu'ils puissent être validés lors des tests.

4.4 Résultats de la simulation

Pour chaque découpeur d'images dessiné, fabriqué et testé à l'Observatoire de Lyon, cette modélisation a été très utile afin de confronter les résultats des tests menés au laboratoire avec ceux de la simulation. A titre d'illustration, les résultats obtenus sur un prototype de technologie « verre » et un prototype en technologie « métallique » sont présentés ici. Les résultats concernant les autres prototypes seront présentés dans les chapitres 3, 4 et 5.

4.4.1 Résultats pour le prototype découpeurs d'images en zérodur

Les résultats de ce paragraphe concernent le prototype ESA basé sur le design optique de l'IFS (Integral Field Spectrograph) de l'instrument NIRSpec du JWST (Chapitre 3, § 2.2). Cet instrument couvre le domaine proche infrarouge (1.0 – 5.0 μm) avec un champ de vue de 40×40 secondes d'arc. Cet IFU est équipé d'un concept à base de découpeur d'images à trois éléments réfléchissants (miroir découpeur, miroir pupille et miroir fente).

Les simulations ont été effectuées à 0.57 μm pour la configuration correspondant au premier jeu de trois miroirs. De plus, étant donné que les mesures de forme et de rugosité sont en adéquation avec la technique du polissage sur le verre, seules les aberrations géométriques sont introduites dans les simulations. La simulation utilise des matrices 2048×2048 .

Les paramètres d'entrée sont listés dans le Tableau 2- 1.

| Paramètres d'entrée | Simulation Plan Champ | Simulation Plan Pupille |
|--|---|--|
| Longueur d'onde (mm) | 0.57 e-3 | |
| Pupille du télescope | | |
| Diametre en X (mm) | 2.6 | |
| Diametre en Y (mm) | 1.3 | |
| Distance Pupille-Slice (mm) | 150 | |
| Miroir Découpeur | | |
| Longueur de la slice (mm) | 27 | |
| Largeur de la slice (mm) | 0.9 | |
| Distance Slice - Elément pupille (mm) | 150.722 | |
| Fichier Zemax contenant les aberrations au niveau de la slice | | Wavefront_Map_Proto_2_PlanPupille.txt |
| Elément Pupille | | |
| Longueur d'un élément pupille (mm) | 2.754 | |
| Largeur d'un élément pupille (mm) | 4 | |
| Distance Elément pupille - Elément fente (mm) | 13.114 | |
| Fichier Zemax contenant les aberrations au niveau de l'élément pupille | Wavefront_Map_Proto_2_PlanFente_Conf1.txt | |
| Elément Fente | | |
| Longueur d'un élément fente (mm) | 2.754 | |
| Largeur d'un élément fente (mm) | 3 | |
| Distance Elément fente - Plan de sortie (mm) | 50 | |
| Fichier Zemax contenant les aberrations au niveau de l'élément fente | | Wavefront_Map_Proto_2_PlanExitPupil_11.txt |
| Plan de la pupille de sortie | | |
| Longueur du plan de sortie (mm) | 15 | |
| Largeur du plan de sortie (mm) | 15 | |

Tableau 2- 1 : Paramètres d'entrées pour la modélisation du prototype « ESA »

Les résultats de la simulation dans tous les plans de ce système découpeur d'images sont présentés de la Figure 2- 11 à la Figure 2- 14. Ils sont représentés sous forme d'images, mais ils sont aussi stockés dans des fichiers textes.

- Plan de la pupille intermédiaire (résultat de la simulation dans le plan pupillaire)

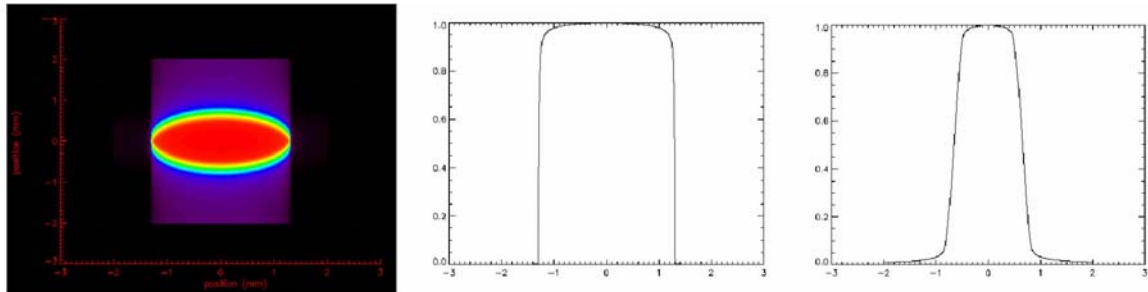


Figure 2- 11 : Image de la pupille du télescope dans la plan des pupilles intermédiaires. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y

- Plan de la pseudo fente (résultat de la simulation dans le plan champ)

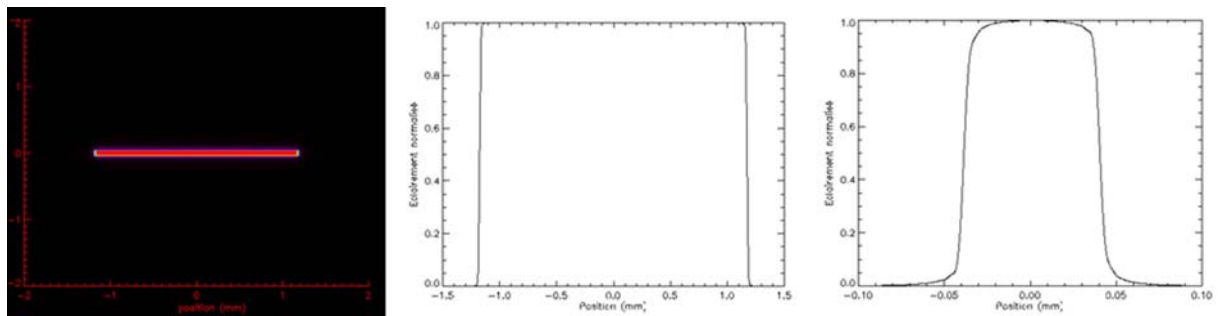


Figure 2- 12 : Image de la slice dans le plan de la pseudo fente. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y

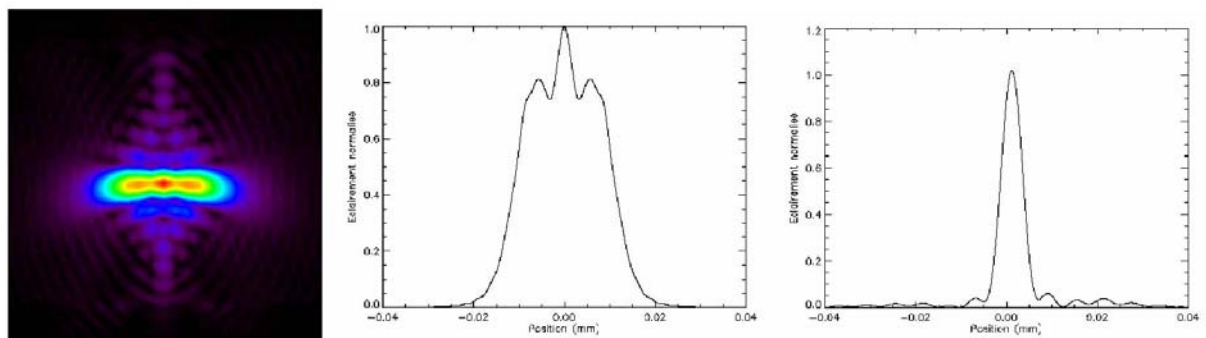


Figure 2- 13 : PSF dans le plan de la pseudo fente. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y

- Plan de la pupille de sortie (résultat de la simulation dans le plan pupillaire)

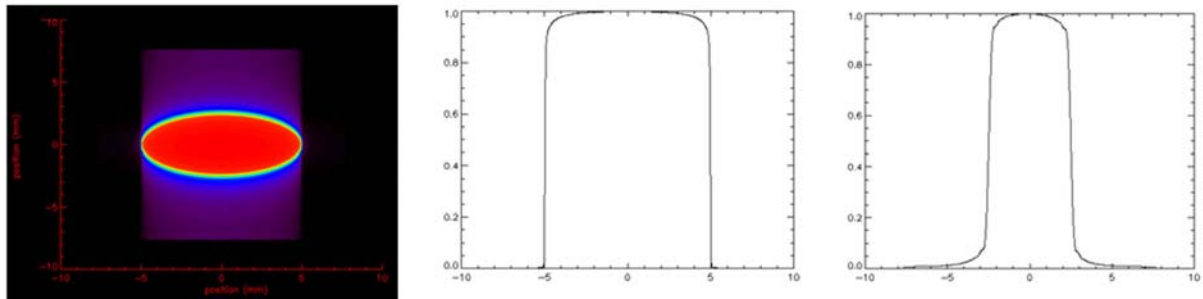


Figure 2- 14 : Pupille de sortie du système découpeur d'images. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y

Dans les chapitres suivants, les résultats des simulations seront comparés aux résultats mesurés lors des tests.

4.4.2 Résultats pour les prototypes découpeurs d'images métalliques

Les résultats ci-dessous concernent un nouveau concept de découpeur d'images proposé au début de la Phase Préliminaire de Design de l'instrument MUSE (Chapitre 5). Il est composé d'un miroir découpeur et d'une matrice de miroirs pupille. Ces derniers jouent le rôle des éléments fente et des éléments pupille (ils envoient la pupille à l'infini et imagent les slices dans le plan de la pseudo fente). La particularité de ce miroir découpeur est qu'il est fabriqué en technologie usinage diamant sur des métaux comme l'aluminium, l'acier ou le cuivre. L'état de surface dû à la trace de l'outil diamant peut être assimilé à une fonction cosinus d'amplitude PTV notée « a » et de période notée « p ». Les rugosigrammes permettent de déterminer les caractéristiques de cette fonction cosinus. Le Tableau 2- 2 résume les paramètres d'entrée de la simulation pour un tel découpeur d'images.

| Paramètres d'entrée | Simulation Plan Champ | Simulation Plan Pupille |
|--|---|-------------------------|
| Longueur d'onde (mm) | 0.57 e-3 | |
| Pupille du télescope | | |
| Diametre en X (mm) | 2.5 | |
| Diametre en Y (mm) | 1.25 | |
| Distance Pupille-Slice (mm) | 150 | |
| Miroir Découpeur | | |
| Longueur de la slice (mm) | 28.8 | |
| Largeur de la slice (mm) | 1 | |
| Distance Slice - Elément pupille (mm) | 161.3 | |
| Amplitude (PTV/2) de l'état de surface cosinusoidal (mm) | 2.00E-05 | |
| Période du l'état de surface cosinusoidal (mm) | 0.025 | |
| Fichier Zemax contenant les aberrations au niveau de la slice | Wavefront_Map_Proto_4_PlanFente.txt | |
| Elément Pupille | | |
| Longueur d'un élément pupille (mm) | 6 | |
| Largeur d'un élément pupille (mm) | 2 | |
| Distance Elément pupille - Plan de la pseudo fente (mm) | 12.14 | |
| Amplitude (PTV/2) de l'état de surface cosinusoidal (mm) | 2.00E-05 | |
| Période du l'état de surface cosinusoidal (mm) | 0.025 | |
| Fichier Zemax contenant les aberrations au niveau de l'élément pupille | Wavefront_Map_Proto_4.txt | |
| Plan de la pseudo fente | | |
| Longueur du plan de la pseudo fente (mm) | 4.5 | |
| Largeur du plan de la pseudo fente (mm) | 4.5 | |
| Distance Elément Pupille - Plan de sortie (mm) | 50 | |
| Fichier Zemax contenant les aberrations au niveau de l'élément fente | Wavefront_Map_Proto_4_PlanExitPupil.txt | |
| Plan de la pupille de sortie | | |
| Longueur du plan de sortie (mm) | 24 | |
| Largeur du plan de sortie (mm) | 24 | |

Tableau 2- 2 : Paramètres d'entrées pour la modélisation du prototype « MUSE » en tournage diamant

La Figure 2- 15 représente l'image de la slice dans le plan de la pseudo fente en tenant compte des effets de diffraction, des aberrations géométriques, de l'état de surface du miroir pupille ($a_{PTV} = 40$ nm et $p = 25$ μ m). La Full Width Half Maximum (FWHM) de la fente est identique à celle donnée par un miroir pupille sans défaut de surface. En revanche, la longueur de la fente augmente de 25% si le profil d'énergie est pris au bas du pic. Un phénomène de chevauchement (ou « crosstalk » en anglais) des fentes dans le plan de la pseudo fente apparaîtra. La mesure de chevauchement est un facteur clé lors de la validation d'un système découpeur d'images. Un diaphragme devra être correctement positionné afin de remédier à ce problème. Néanmoins, peu de flux est localisé dans cette sur-longueur (0.3 %).

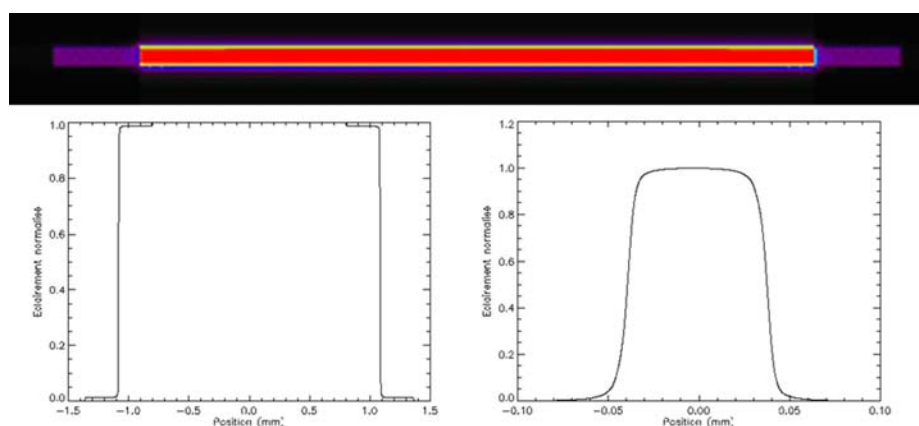


Figure 2- 15 : Image de la slice dans le plan de la pseudo fente. De gauche à droite : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y

La Figure 2- 16 illustre la PSF dans le plan de la pseudo fente. On remarque qu'il y a deux images fantômes situés à 276 μm du pic central de la PSF. L'énergie maximale dans ces images parasites s'élève à 1.2 % pour le profil périodique présenté ci-dessus. Dans le plan de la pseudo fente, trois images de la fente apparaîtront. Le diaphragme placé dans ce plan permettra d'éliminer les images fantômes. En revanche, la perte de flux est inévitable.

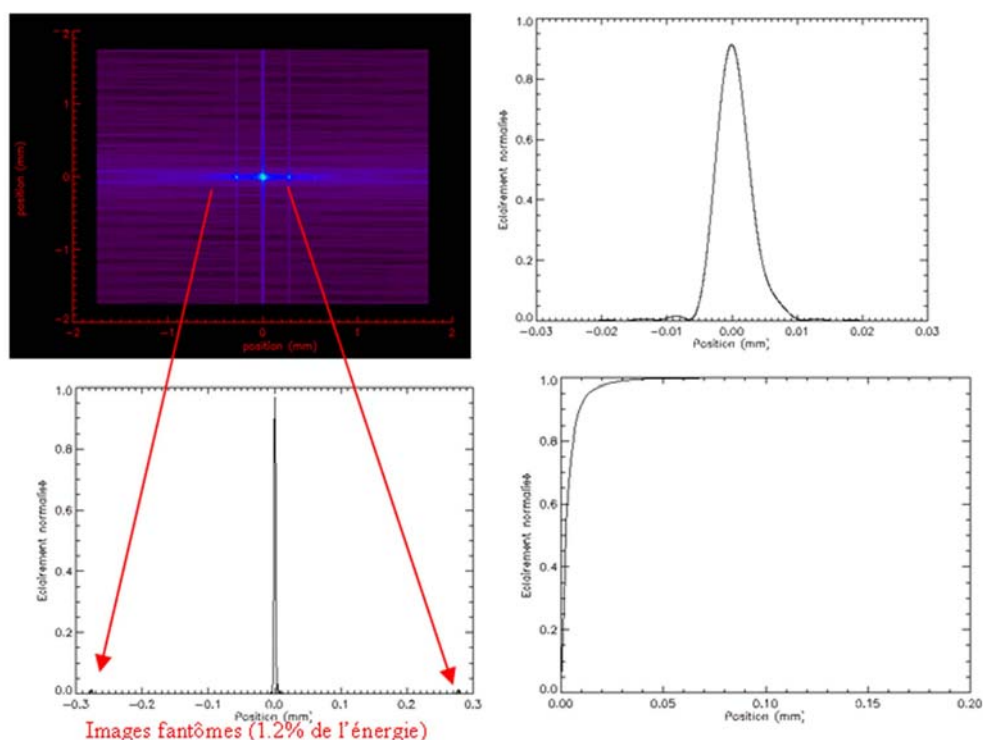


Figure 2- 16 : PSF dans le plan de la pseudo fente : vue 2D, coupe suivant l'axe x, coupe suivant l'axe y

Le chapitre 5 donne plus d'explications sur les problèmes engendrés par l'état de surface des éléments optiques fabriqués en usinage diamant.

5 Conclusion

Après avoir décrit les découpeurs d'images via leur principe en double conjugaison, leurs caractéristiques géométriques, leur optimisation et leur méthodologie de tests, ce chapitre présente deux outils logiciels qui permettent de mieux appréhender un système découpeur

d'images. Le premier calcule le pourcentage de zones de blocages des rayons lumineux sur le miroir découpeur. Le second repose sur une simulation d'un système découpeur d'images en tenant compte des effets de diffraction, des aberrations géométriques et de l'état de surface des éléments optiques. C'est un modèle rapide d'analyse aidant à l'interprétation des résultats mesurés au laboratoire dans les trois plans définis lors de la méthodologie de tests. Néanmoins, cette simulation souffre de l'approximation d'isoplanétisme qui est simplificatrice pour les calculs.

Références

1. Despierres, L., 2004, « Programme de calcul des blocages sur un découpeur d'images », OPT-STA-TEC-007/2004
2. Goodman, J. W., 2005, "Introduction to Fourier optic - Third edition", Edited by Roberts & Company
3. Brun, G., "Optique de Fourier", Cours DEA OOM, Université Jean Monnet
4. Hayes, J., "Applied optics and optical engineering", Vol XI, Chapitre 2 "Fast Fourier transform and their applications", Edited by R. Shannon and J.C. Wyant
5. Vallon, R., 2003, « Modélisation de la diffraction de l'image slicer », OPT-STA-TEC-022/2003
6. Rolland, S., 2002, « Etude et modélisation des performances d'un système découpeur d'images »

CHAPITRE 3

**TESTS DE PERFORMANCES DE DEUX
DECOUPEURS D'IMAGES
APPLICATION AU JWST**

CHAPITRE 3

TESTS DE PERFORMANCES DE DEUX DECOUPEURS D'IMAGES

APPLICATION AU JWST

1 Introduction

Le futur télescope spatial James Webb Space Telescope (JWST) précédemment appelé Next Generation Space Telescope (NGST) est un imposant observatoire spatial qui devrait être mis en orbite en juin 2013 à bord d'un lanceur Ariane V (Figure 3- 1). Il sera situé au point Lagrange L2 qui se trouve à une distance de 1,5 millions de kilomètres de la Terre. Présenté comme le successeur du télescope spatial Hubble (HST), il est présentement développé par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en collaboration avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et l'Agence Spatiale Canadienne (CSA). Le JWST aura une durée de vie opérationnelle de 5 à 10 ans et vu son éloignement, il ne pourra pas être réparé et entretenu par des astronautes [1].

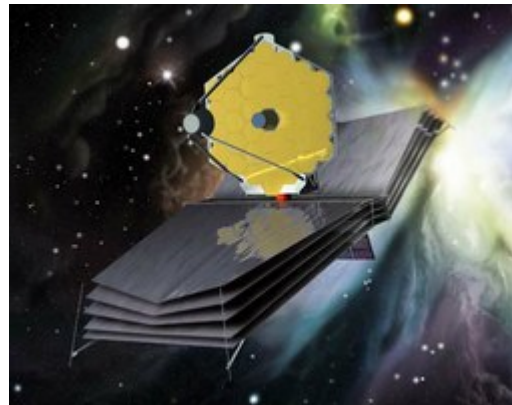


Figure 3- 1: Le futur télescope spatial JWST

La mission JWST gravite autour de l'observation de cibles allant des objets situés à l'intérieur du système solaire aux galaxies les plus éloignées dont on pourra observer la formation au tout début de la création de l'Univers afin de comprendre nos origines [2].

Le JWST sera un télescope à miroirs multiples – le miroir principal a un diamètre d'environ 6,5 m constitué de 16 miroirs hexagonaux – associé à un grand pare-soleil qui ne seront déployés qu'après le transfert en orbite. Le système sera refroidi passivement à une température d'environ 50 Kelvin (K)¹, conférant ainsi au JWST un rendement exceptionnel dans les gammes d'ondes du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen (0,6 et 28 μm).

Pour éclaircir les mystères qui entourent les premiers instants de notre Univers, le JWST est équipé de trois instruments :

- Une caméra proche infrarouge NIRCam [3],
- Un instrument moyen-IR MIRI [4],
- Un spectrographe NIRSpec [5].

NIRCam sera composé de deux imageurs couvrant chacun un champ de vue (Field of View – FoV) de 2.35×2.35 minutes d'arc dans le domaine de longueur d'onde de 0.6 à 5 μm . Chaque imageur sera séparé en deux gammes de longueurs d'ondes par une dichroïque à 2.35 μm . Cet instrument dont le challenge technologique repose sur la fabrication des détecteurs est développé par la NASA et le CSA. L'instrument MIRI, réalisé conjointement par la NASA et l'ESA, devrait être équipé d'un imageur avec un FoV de 1.3×1.7 minutes d'arc et d'un spectrographe dans le domaine de longueur d'onde de 5 à 27 μm . Le spectrographe, qui

¹ $\text{Température}_{\text{Kelvin}} = \text{Température}_{\text{Celsius}} + 273.15$

possède un FoV maximum de 7×7 secondes d'arc, est divisé en quatre voies – suivant le domaine de longueur d'onde – alimentant quatre systèmes découpeur d'images.

Le dernier instrument, NIRSpec, est un spectrographe dans le domaine de longueur d'onde allant de 0.6 à 5 μm avec un champ de vue de 3×3 minutes d'arc. Le design actuel fournit trois modes d'observations :

- Un mode basse résolution,
- Un mode multi-objets basé sur le concept de matrice de micro obturateurs (MEMS – Micro-Electromechanical System),
- Un mode IFU équipé d'un système découpeur d'images.

L'ESA a la responsabilité du développement de cet instrument bien que la NASA fournisse les MEMS et les détecteurs.

Ce chapitre présente les tests de performances de deux systèmes découpeurs d'images appliqués à l'instrument NIRSpec du télescope JWST. Dans un premier temps, les schémas optiques généraux des systèmes ainsi que ceux des deux prototypes réalisés seront présentés. Dans un second temps, nous étudierons la fabrication des éléments individuels constituant le découpeur d'images. Ensuite, nous nous focaliserons sur l'assemblage de ces composants individuels ainsi que sur leur contrôle. Afin de valider les systèmes découpeurs d'images, des bancs de tests ont été installés pour vérifier les spécifications de haut niveau. Ces différents tests (à différentes longueurs d'ondes et température) ainsi que leurs résultats et interprétations seront analysés dans ce chapitre. Enfin, une conclusion comparative entre les deux prototypes montrera l'évolution du programme de R&D en collaboration avec Cybernétix sur les systèmes découpeurs d'images.

Ce chapitre est illustré par deux communications SPIE (Annexe 3). L'une présentée au SPIE « Optical Systems Design 2003 » qui s'est déroulée à Saint Etienne (France) du 30 septembre au 3 octobre 2003 intitulée : « Optical Design, Fabrication and Testing a prototype of the NIRSpec IFU » [6]. L'autre au SPIE « Astronomical Telescopes and Instrumentation 2004 » qui s'est déroulée à Glasgow (Ecosse) du 21 au 25 juin 2004 intitulée : « Designing, manufacturing and testing of an advanced image slicer prototype for the JWST » [7].

2 Design Optique

2.1 Integral Field Unit (IFU) de NIRSpec

En 1999, le groupe de travail scientifique du NGST (NGST Ad Hoc Science Working Group), émet l'idée d'un module optionnel intégré dans l'instrument NIRSpec du JWST [5]. Ce module aura pour objectif scientifique la mesure de masses des jeunes galaxies à haut décalage vers l'infrarouge, l'étude des noyaux de galaxies à haute résolution et des amas stellaires denses. Le LAM associé à EADS Space – Astrium GmbH, décide de développer cette option durant la Phase A¹ de NIRSpec. Le concept repose sur l'étude d'un IFU à base d'un découpeur d'images, placé à côté des MEMS utilisant le même spectrographe ainsi que les mêmes filtres et détecteurs (Figure 3- 2). Cet IFU couvrira un champ de vue de 2×2 secondes d'arc échantillonné sur le détecteur à 0.05 seconde d'arc par pixel. De plus, la résolution spectrale atteindra 2700 au milieu de la bande spectrale NIRSpec (0.6 – 5.0 μm). Actuellement, l'IFU de NIRSpec entre dans sa Phase B² et est sous la responsabilité du maître d'œuvre industriel.

¹ Phase A : Phase d'études de concepts techniques et de définition d'un plan de développement

² Phase B : Approfondissement de l'étude des solutions techniques, modélisation et fabrication de prototypes

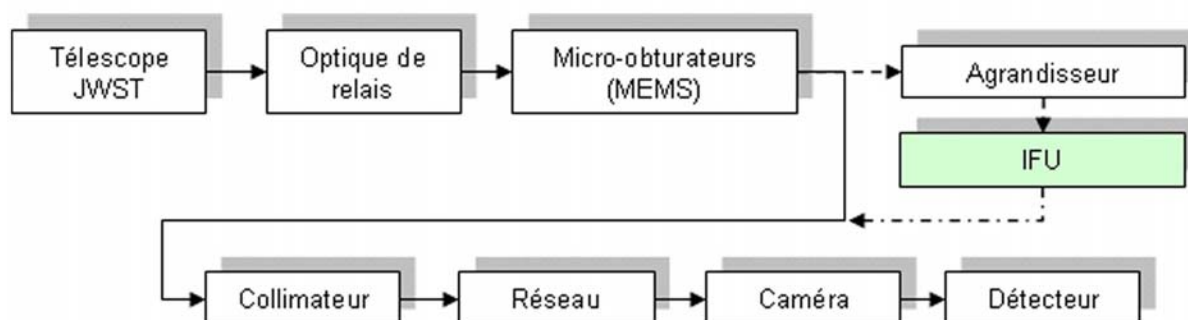


Figure 3- 2 : Diagramme fonctionnel de l'IFU de NIRSpec

2.1.1 Présentation du système découpeur d'images de l'IFU

L'IFU de NIRSpec est composé d'un système découpeur d'images dont le principe a été présenté au Chapitre 2. Il est formé de trois éléments optiques [8]:

- Un miroir découpeur à 42 slices,
- Une barrette de 42 miroirs pupille,
- Une barrette de 42 miroirs fente.

Les caractéristiques géométriques et optiques de chaque composant sont rassemblées dans le Tableau 3- 1. Les angles d'incidence et les distances entre chaque unité sont donnés par la Figure 3- 3. Le Tableau 3- 2 résume, quant à lui, les données d'entrée/sortie de l'IFU.

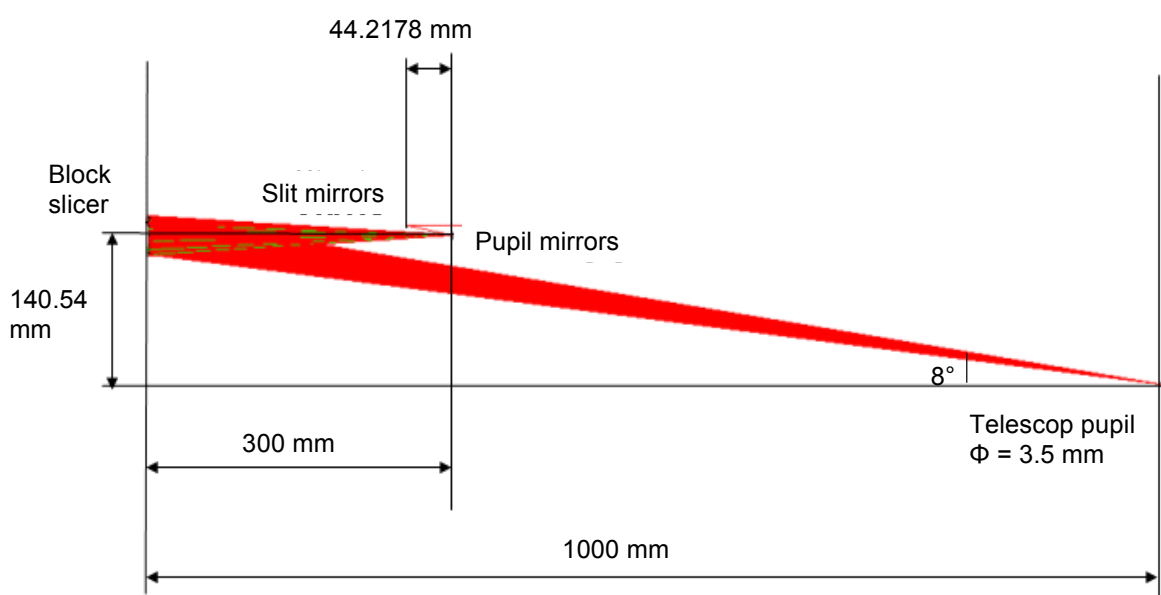


Figure 3- 3 : Design optique de l'IFU de NIRSpec

2.1.2 Caractéristiques du prototype nommé « Prototype CRAL »

En collaboration avec le LAM, le CRAL et Cybernétix SA lance un programme de Recherche et développement (R&D) sur les performances optiques d'un prototype basé sur le design et les spécifications de haut niveau de l'IFU de NIRSpec présenté au paragraphe 2.1.1. Ce prototype a pour but de valider :

- La fabrication des éléments individuels (miroirs sphériques et tiltés),

- L'assemblage de ces composants,
- Les performances optiques de haut niveau du système (grandissement et qualité image).

Ce prototype est constitué d'un miroir découpeur à 11 slices correspondant aux slices n°16 à n°26 de l'IFU de NIRSpec et d'une barrette de 10 miroirs pupille (n°17 à n°26). Les caractéristiques géométriques sont identiques à celles citées dans le Tableau 3- 1. Pour des questions de coût, les miroirs fente n'ont pas été fabriqués. En effet, de part leurs caractéristiques géométriques, ils ressemblent très fortement aux miroirs pupille. Si on démontre la faisabilité de la barrette de miroirs pupille, on en déduira celle de la barrette de miroirs fente. Toujours pour limiter les coûts, toutes les slices ont le même rayon de courbure (462.75 mm) ainsi que les miroirs pupille (78.46 mm). Cette activité de R&D sur la faisabilité du découpeur d'images de l'IFU de NIRSpec, a débuté en janvier 2001 et s'est achevée en janvier 2003 suivant le planning présenté sur la Figure 3- 4.

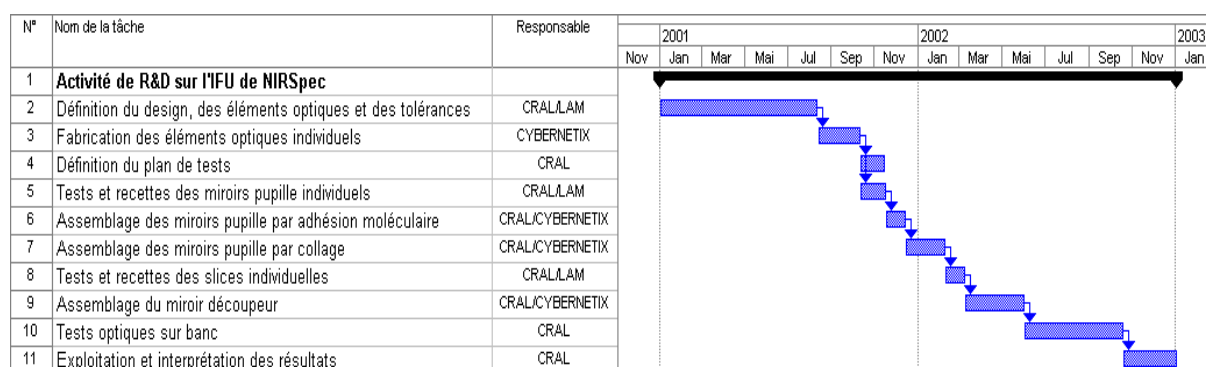


Figure 3- 4 : Planning du prototype CRAL

2.2 Integral Field Spectrograph (IFS) de NIRSpec

L'ESA est le maître d'ouvrage de l'instrument NIRSpec du JWST (§ 1). Le concept de base de cet instrument est un spectrographe multi-objets (MOS) utilisant des matrices de micro obturateurs. Toutefois, à travers le concept alternatif Integral Field Multi Object Spectrograph (IFMOS) [9] proposé par le LAM, l'ESA conserve une solution de rechange au MOS. Le champ de vue de IFMOS est de 40×40 secondes d'arc échantillonné à 0.2 seconde d'arc par pixel, couvrant le domaine de longueur d'onde proche IR (1.0 – 5.0 μm) avec une résolution spectrale de 150.

2.2.1 Présentation du système découpeur d'images de l'IFS

Le cœur de IFMOS est constitué d'un système découpeur d'images qu'on appellera ici IFS de NIRSpec. Il se compose de :

- Deux miroirs découpeur de 30 slices chacun, placés côte à côte,
- Deux barrettes de miroirs pupille de 30 miroirs chacune, placées l'une en dessus de l'autre,
- Deux barrettes de miroirs fente de 30 miroirs chacune, placées l'une en dessus de l'autre.

Cet IFS produit deux pseudo fentes à l'entrée de deux spectrographes (Figure 3- 5). La distance entre le miroir découpeur et les barrettes de miroirs pupille est d'environ 150 mm. Celle entre les miroirs pupille et fente est approximativement de 13 mm [10]. Le Tableau 3- 1

et le Tableau 3- 2 résumant les caractéristiques géométriques des éléments optiques et les paramètres d'entrée/sortie de l'IFS de NIRSpec.

Le rapport longueur sur largeur d'une slice passe de 21 à 30 ce qui impose des contraintes supplémentaires sur la fabrication. De plus, le champ de vue étant plus important, ceci entraîne des performances optiques dégradées sur le bord du champ, resserrant ainsi les tolérances sur le découpeur d'images et sur les barrettes de miroirs pupille et fente.

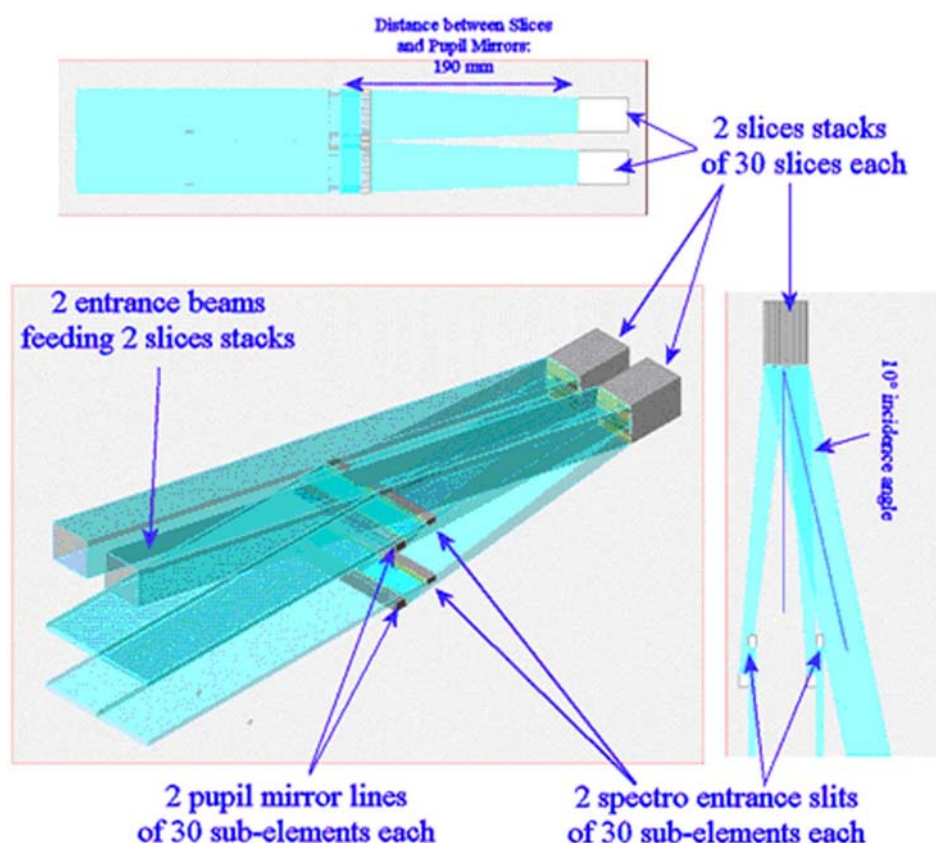


Figure 3- 5 : Design optique de l'instrument IFMOS

| | IFU NIRSpec | | | IFS NIRSpec | | |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------|------------------------|--------------|
| | Slice | Miroir Pupille | Miroir Fente | Slice | Miroir Pupille | Miroir Fente |
| Dimension (mm) suivant l'axe x | 18.9 | 3.042 | 3.042 | 27 | 2.754 | 2.754 |
| Dimension (mm) suivant l'axe y | 0.9 | 6 | 4 | 0.9 | 4 | 3 |
| Rayon de courbure (mm) | Variable (462.5 à 471.2) | Variable (78.45 à 78.68) | 88.43 | 151.1 | Variable (18.9 à 26.0) | 23.8 |
| Tilt autour de l'axe x | Variable | Variable | Aucun | Variable | Variable | Aucun |
| Tilt autour de l'axe y | Variable | Variable | Variable | Variable | Variable | Variable |

Tableau 3- 1 : Caractéristiques géométriques et optiques des éléments composant l'IFU et l'IFS de NIRSpec

| | IFU NIRSpec | IFS NIRSpec |
|---|---|---|
| Dimension de la pupille d'entrée (mm) suivant l'axe x | 3.5 | 2.6 |
| Dimension de la pupille d'entrée (mm) suivant l'axe y | 1.75 | 1.3 |
| Nombre F/D en entrée suivant l'axe x | 285.6 | 58 |
| Nombre F/D en entrée suivant l'axe y | 571.2 | 116 |
| Nombre F/D en sortie suivant l'axe x | 41 | 7.7 |
| Nombre F/D en sortie suivant l'axe y | 82 | 15.4 |
| Position (mm) suivant l'axe z de la pupille d'entrée | 1000 | 150 |
| Grandissement du système découpeur d'images | 0.15 | 0.09 |
| Energie encerclée dans le plan de la pseudo fente | 80 % dans un cercle de 66.5 μm de diamètre | 80 % dans un cercle de 46 μm de diamètre |

Tableau 3- 2 : Spécifications d'entrée/sortie de l'IFU et de l'IFS de NIRSpec

2.2.2 Caractéristiques du prototype nommé « Prototype ESA »

En septembre 2002, l'ESA décide de lancer une étude menant à développer un prototype découpeur d'images et à démontrer sa qualification dans un environnement spatial. Cette étude, basée sur le design optique de l'instrument de rechange IFMOS (§ 2.2.1), est attribuée à un consortium mené par le LAM, incluant le CRAL et l'Université de Durham. Ce prototype est composé de [11]:

- Un miroir découpeur à 30 slices (20 slices dont les surfaces actives sont planes et 10 slices représentatives de l'IFS – n°19 à 28),
- Une barrette de 5 miroirs pupille (n°19 à 23),
- Une barrette de 5 miroirs fente (n°19 à 23),
- Une structure opto-mécanique fabriqué en Invar.

Chaque miroir pupille a le même rayon de courbure (24.85 mm) ce qui est rendu possible par la proximité des 5 miroirs pupille adjacents. De plus, pour des raisons financières, les miroirs fente sont des miroirs sphériques non tiltés. Les autres caractéristiques géométriques sont identiques à celles citées dans le Tableau 3- 1. Ce prototype nommé « prototype ESA » doit répondre aux exigences du niveau Technology Readiness Levels 6 (TRL6¹) défini par l'ESA.

Il a pour but de démontrer :

- La fabrication et l'assemblage de 30 slices aux tolérances demandées,
- La tenue de la structure opto-mécanique,
- Le pré-alignement mécanique,
- La validation du prototype à travers ses performances optiques, à température ambiante et cryogénique, dans le visible, et soumis à des vibrations.

Le planning (Figure 3- 6) donne une vue de la durée du projet qui s'est étalé sur deux ans.

¹ TRL6 : Modèle du système ou prototype de démonstration dans l'environnement final.

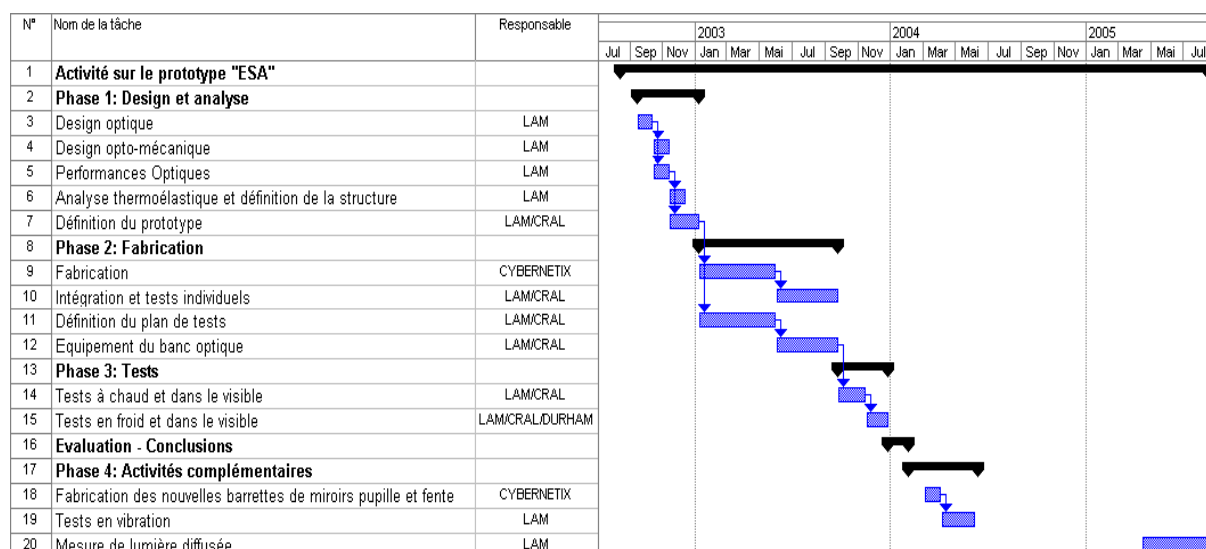


Figure 3- 6 : Planning du prototype ESA

Les prototypes CRAL et ESA sont deux prototypes pour une application au JWST qui ont été dessinés, fabriqués et testés en partie à l'Observatoire de Lyon. On constate que le dimensionnement, les tolérances, les difficultés de fabrication et de tests croissent du prototype CRAL au prototype ESA, ainsi que cela est présenté dans les paragraphes suivants.

3 Fabrication

Cybernétix SA (Marseille, France) est une entreprise développant des activités d'ingénierie d'innovation et de fabrication d'équipements; ceci dans les domaines de la robotique manufacturière et de service. Pour cela, la société dispose de ressources humaines pluridisciplinaires maîtrisant l'automatisme et la robotique et des services techniques plus spécialisés (optique, mécanique, électrotechnique, électronique, vision, contrôle-commande et traitement d'images). Différents moyens matériels sont mis à la disposition des projets pour les phases de conception dans les bureaux d'études et de réalisation dans les ateliers de fabrication et d'intégration.

L'étude de systèmes optiques novateurs est menée à bien grâce à des moyens de conception et de simulation (Zemax, IDL) qui permettent de modéliser toutes les grandeurs physiques à des fins d'analyse, mesure, localisation et d'identification. Une unité – Cybernétix Industrie, Manosque – fabrique des systèmes de haute précision et une autre unité d'intégration – Stigma Optique – assemble ces éléments. Dans le cadre de la bourse CIFRE, l'étude de R&D entre Cybernétix et le CRAL porte sur la fabrication, l'assemblage et la qualification des miroirs découpeurs et des barrettes de miroirs pupille et fente. Le travail de collaboration présenté dans ce paragraphe a pour but de définir :

- Les tolérances sur les rayons de courbure, tilts, planéité, parallélisme, perpendicularité,
- Le processus de fabrication en faisant un compromis technologique – coût.

Dans un premier temps, il a fallu choisir le matériau dans lequel les composants individuels seront réalisés. Ce matériau doit présenter les qualités suivantes classées par importance décroissante :

- Faible coefficient de dilatation thermique (CTE) afin de satisfaire un environnement spatial (variation de 300K),

- Assemblage optique par adhérence moléculaire,
- Grande qualité optique après polissage (rugosité < 1 nm RMS),
- Faible coût,
- Revêtement (coating en anglais) réalisable,
- Compatibilité entre la structure mécanique et les composants optiques.

On distingue trois catégories de matériaux possibles [12] : les verres thermiquement stables (Zérodur, Pyrex, Silice fondue, Ultra-Low Expansion Corning – ULE), les métaux (Aluminium, Béryllium, Invar) et les céramiques (SiC, C-SiC). Afin de satisfaire les qualités du matériau citées précédemment, seuls les verres permettent de faire un assemblage par adhérence moléculaire. Parmi, ces verres, le Zérodur fabriqué par Schott et l'ULE de Corning offrent les CTE les plus faibles ($0.01 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ pour le Zérodur, 0.05 pour ULE, contre 0.56 pour la silice fondue et 3.4 pour le pyrex –Figure 3- 7). Pour des raisons de coût, le Zérodur a été préféré à l'ULE pour la fabrication de tous les miroirs équipant les prototypes testés à l'Observatoire de Lyon.

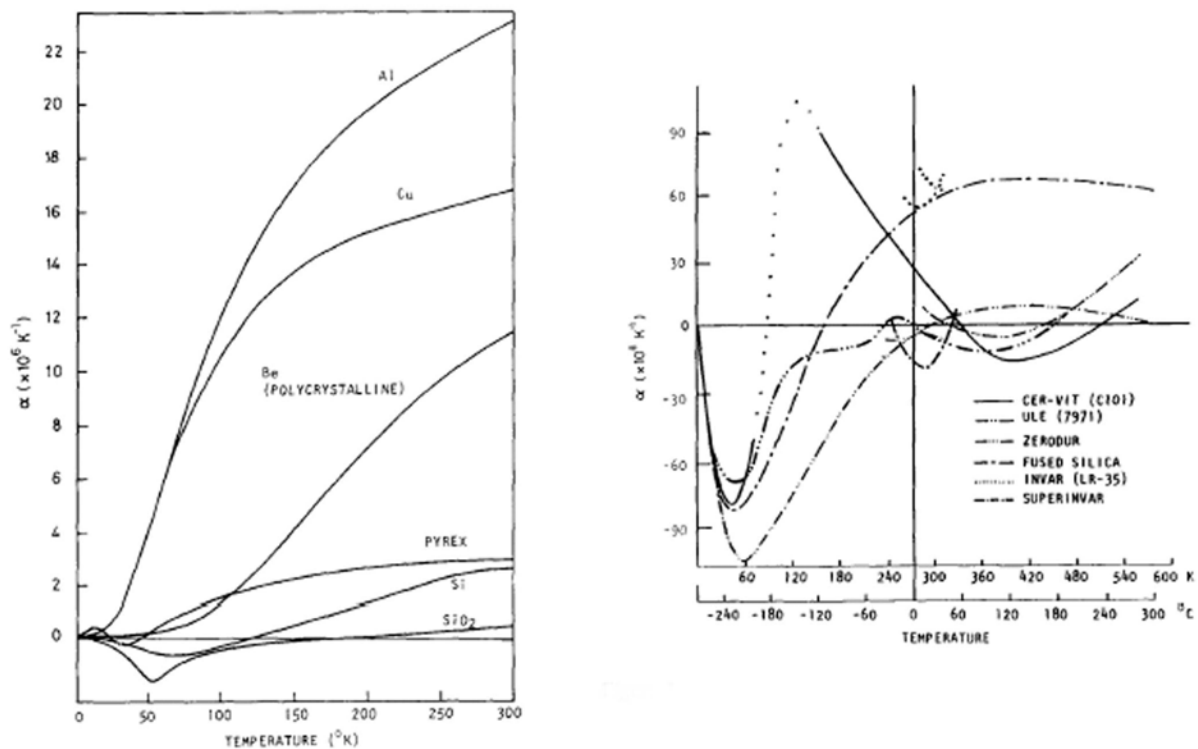


Figure 3- 7 : CTE pour différents verres [13]

3.1 Techniques de fabrication

Pour le polissage des surfaces planes ou sphériques, les moyens de production conventionnels restent largement utilisés malgré la part importante de main d'œuvre spécialisée qu'ils nécessitent. Ceci peut être lié aux séries à réaliser qui sont trop petites pour être automatisées. La technologie classique de fabrication par polissage utilisée par Cybernétix lors de la fabrication de nos prototypes repose sur quatre étapes :

- L'ébauchage. A partir du palet au diamètre exact voulu et aux courbures et épaisseurs approchées convenables, l'ébauchage est une opération qui consiste à user le verre avec un outil diamanté pour lui donner l'épaisseur définitive ainsi que les rayons de courbure désirés. Un abrasif mouillé est interposé entre l'outil et le miroir.

- Le réunissage élimine les irrégularités de forme entre le miroir et l'outil. Cette phase prend fin lorsque les deux disques s'épousent parfaitement (défauts de l'ordre du dixième de millimètre).
- Le doucissage consiste à affiner le grain du verre de chaque côté sans modifier les courbures. On frotte le verre au moyen d'un outil au rayon du verre et en utilisant des émeris en suspension dans l'eau de plus en plus fins au cours de l'opération.
- L'opération de polissage est identique à la précédente mais l'outil est recouvert d'un feutre à polir et l'émeri est remplacé par un abrasif encore plus fin. Pendant le polissage, aucune matière n'est enlevée. Il se produit un fluage, les bosses qui constituent le grain du verre sont progressivement poussées dans les creux de façon à parfaitement lisser celle-ci et diminuer les défauts de formes et de rugosité.

En polissage classique, l'état de surface atteint facilement $\lambda/10$ RMS avec une rugosité inférieure à 2 nm RMS.

3.2 Fabrication et contrôles du prototype CRAL

3.2.1 Processus de fabrication

Dans le cadre de la spectroscopie intégrale de champ, le prototype CRAL fut la première réalisation mondiale d'un miroir découpeur équipé de slices sphériques et tiltées. Le processus de fabrication est le suivant (Figure 3- 8) :

- Etape A : Ebauchage d'une slice de 5 mm d'épaisseur,
- Etape B : Polissage des deux faces de référence (faces latérale et arrière) à $90^\circ \pm 30''$, utile pour l'assemblage des slices,
- Etape C : Polissage de la surface optique à $\lambda/4$ avec le positionnement correct du centre de courbure du miroir sphérique – $R = 462.75 \pm 0.25$ mm, $\Delta X_c = \pm 34$ μ m (correspondant à un angle de $30''$), $\Delta Y_c = \pm 67$ μ m (soit $1'$), $\Delta Z_c = \pm 250$ μ m,
- Etape D : Désépaississement de la slice pour atteindre sa largeur finale de 0.9 ± 0.01 mm en respectant le parallélisme de $5''$ entre les deux surfaces d'adhérence et en conservant le positionnement du centre de courbure.

Les angles cassés de part et d'autre de la surface active évitent d'obtenir un angle droit au bord des slices, facilement friables lors d'un tel processus de fabrication. De plus, il facilite une désadhérence moléculaire volontaire lors d'un mauvais assemblage (Figure 3- 9).

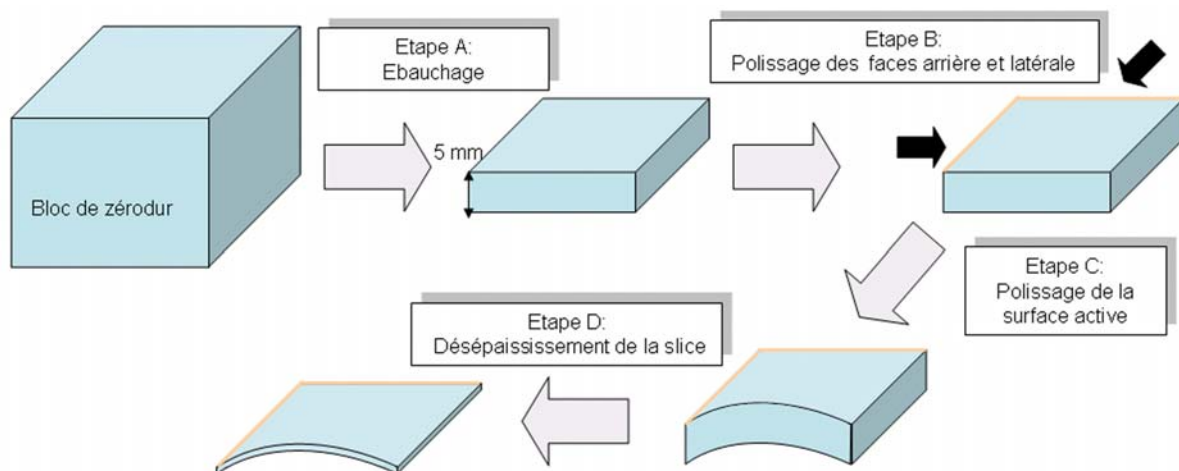


Figure 3- 8 : Processus de fabrication des slices du prototype CRAL

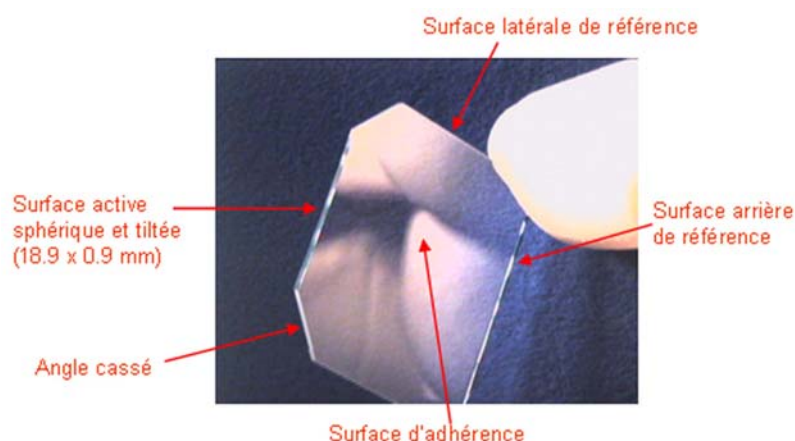


Figure 3- 9 : Une slice du prototype CRAL

Les miroirs pupille (Figure 3- 10) ont été fabriqués avec le procédé présenté sur la Figure 3- 8 avec les spécifications suivantes :

- Polissage de la surface optique à $\lambda/4$ avec le positionnement correct du centre de courbure ($R = 78.46 \pm 0.1$ mm, $\Delta X_c = \pm 6$ μ m, $\Delta Y_c = \pm 6$ μ m, $\Delta Z_c = \pm 100$ μ m),
- Les deux faces perpendiculaires d'appui sont à $90^\circ \pm 15''$.

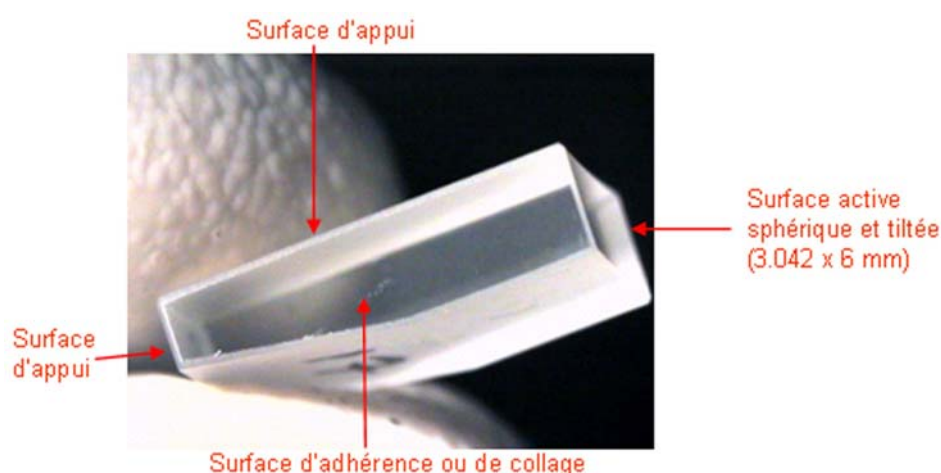


Figure 3- 10 : Un miroir pupille du prototype CRAL

3.2.2 Processus de contrôle

Lors de la fabrication de ses éléments optiques, il est nécessaire de les contrôler individuellement afin de vérifier les spécifications et d'améliorer la fabrication pour les prototypes suivants. Plusieurs contrôles ont été effectués aussi bien sur les slices que sur les miroirs pupille. Les résultats des tests effectués sur les slices individuelles et sur les miroirs pupille sont respectivement présentés dans les documents [14] et [15]. Cependant, les principales conclusions sont énoncées ci-après.

Parmi ces contrôles, le profilomètre STIL¹ mesure le rayon de courbure et les angles des unités. Le rayon de courbure de chaque slice est conforme à la spécification. En revanche, la

¹ La microtopographie de la surface d'un objet consiste à enregistrer l'altitude "Z" de chaque point de cette surface. Afin de déterminer cette altitude sans devoir procéder par focalisation dynamique c'est-à-dire sans aucun mouvement mécanique d'aucun composant le long de l'axe z, il faut procéder à un codage de l'espace de mesure, autre que temporel. Dans le profilomètre, l'espace de mesure est codé spectralement en mettant à profit le chromatisme axial des objectifs, que les opticiens s'efforcent habituellement de réduire sinon de corriger. Le

précision de mesure du profilomètre ne valide pas les angles des slices et des miroirs pupille. En effet, il est difficile de définir une référence commune à toutes les surfaces ce qui rend la mesure imprécise. De plus, le support mécanique doit être amélioré avec une rectification des faces d'appui, l'utilisation de billes en rubis et l'installation de deux dispositifs indépendants de maintien en position des éléments optiques suivant les axes x et y afin que les mesures soient reproductibles. En attendant d'améliorer ce dispositif de mesure, les slices et les miroirs pupille ont été acceptés comme tels. Ils seront vérifiés lors de leur assemblage respectif et lors des tests sur banc optique.

De plus, l'interféromètre Zygo¹ examine le parallélisme et la planéité des surfaces d'adhérence ainsi que la qualité image de la surface active. La qualité image des faces d'adhérence des slices est conforme à la spécification de $\lambda/2$ Peak To Valley (PTV). Toutefois, les slices apparaissent légèrement bombées. De ce fait, lors d'un assemblage d'un nombre important de slices, les surfaces d'adhérence devront être contrôlées régulièrement afin qu'elles puissent être repolies le cas échéant. Concernant les miroirs pupille, la qualité image de la surface active est excellente (meilleure que $\lambda/8$ PTV) ainsi que celle de la face d'appui contre la surface de référence.

De nombreux petits éclats – inférieurs à 20 μm de diamètre – sur le bord de la surface active des slices sont vus à la binoculaire comme le montre la Figure 3- 11. Ces éclats entraînent une perte de lumière sous forme de lumière diffusée et de champ au niveau du miroir découpeur.



Figure 3- 11 : Visualisation des éclats sur le bord des slices

3.3 Fabrication et contrôles du prototype ESA

Fort de l'expérience acquise sur le prototype CRAL, le prototype ESA a pour but d'améliorer la fabrication de slices en verre. Comme au paragraphe 3.2, la fabrication part d'un bloc de Zérodur (Figure 3- 12). Ce dernier est parfaitement contrôlé en terme de perpendicularité et parallélisme à l'aide d'une machine tridimensionnelle. Ensuite, la surface active sphérique et tiltée est polie sur le cube. Une lentille est adhérente sur la surface active de la slice afin de

chromatisme axial est dû à la dispersion (variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde) des verres utilisés dans les instruments d'optique. Comme les caractéristiques optiques d'un objectif dépendent de la longueur d'onde, l'image d'une source ponctuelle de lumière blanche est généralement un continuum de points images monochromatiques répartis le long de l'axe optique.

¹ Le Zygo est un interféromètre laser, fonctionnant suivant le schéma optique de Fizeau avec modulation de phase, qui permet le contrôle sans contact de toutes les surfaces optiques. Les possibilités du Zygo sont nombreuses :

- Vérification de la planéité des surfaces planes,
- Mesure de la surface d'onde en transmission et du parallélisme d'une lame,
- Mesure du rayon de courbure et des défauts d'irrégularité de surfaces concaves et convexes en utilisant des objectifs additionnels appelés « calibres »,
- Evaluation de la performance d'un système complet en surface d'onde. En effet, par couplage avec Zemax, on analyse les aberrations résiduelles de révolution et d'excentrement, et par calcul le programme détermine les variations de déplacement des éléments susceptibles de corriger en totalité ou partiellement les défauts.

remédier au problème des éclats qui ont pu être constatés sur les slices du prototype CRAL. La slice est alors extraite de son bloc par désépaississement du bloc. La métrologie du bloc est faite régulièrement afin de conserver le positionnement du centre de courbure. Ce processus est long et donc très coûteux mais il améliore considérablement la précision de la fabrication des slices. De plus, il élimine la géométrie précédente présentant des angles cassés à 45° de part et d'autre de la surface active.

Les tolérances de positionnement du centre de courbure sont deux fois inférieures au prototype CRAL ($R = 151.1 \pm 0.1$ mm, $\Delta X_c = \pm 20$ μ m, $\Delta Y_c = \pm 20$ μ m, $\Delta Z_c = \pm 20$ μ m) [16].

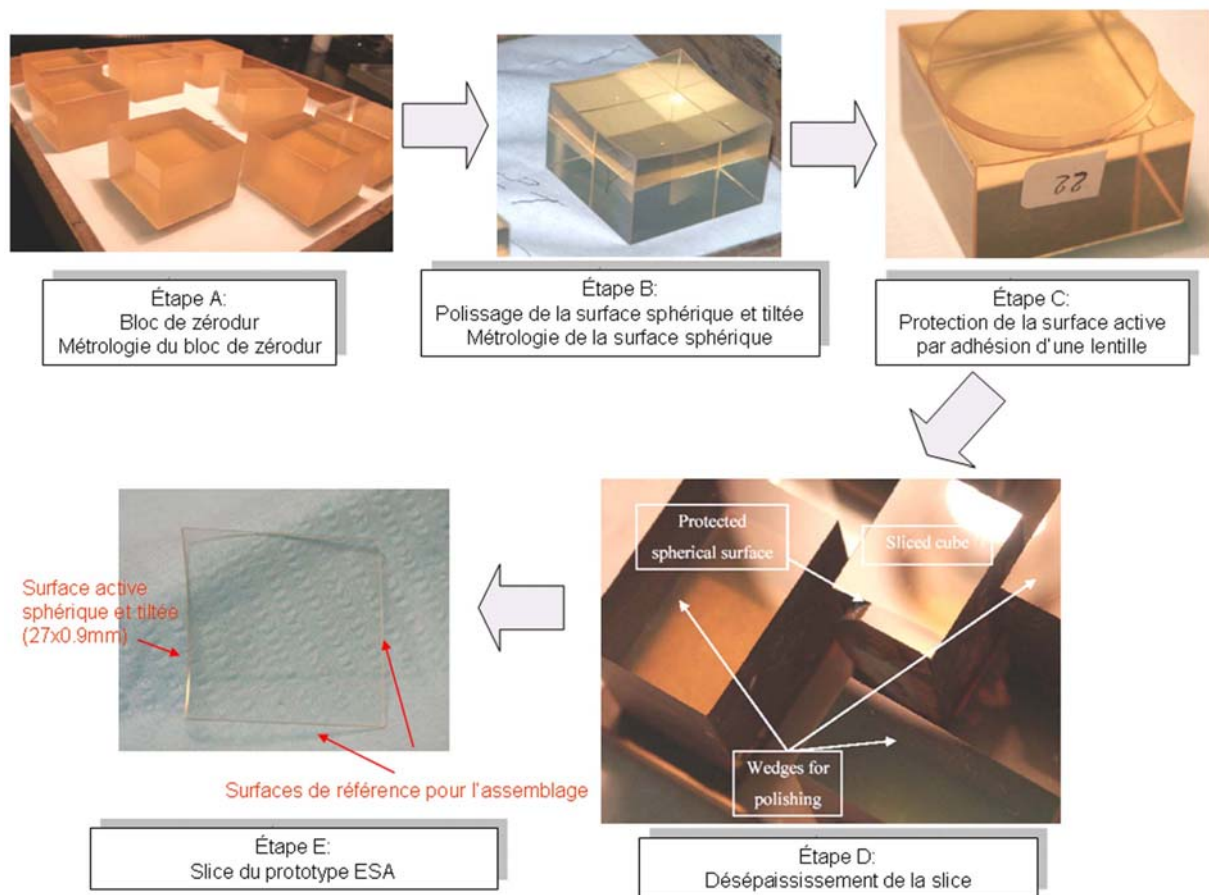


Figure 3- 12 : Processus de fabrication des slices du prototype ESA [17].

Les miroirs pupille et fente ont été fabriqués individuellement comme sur le prototype CRAL mais ils ne présentent pas de biseau sur la face arrière. La qualité optique de la surface active a été contrôlée au Zygo et se révèle excellente ($PTV = \lambda/15$, $RMS = \lambda/80$).

Etant donné que les tests individuels sur les éléments du prototype CRAL n'ont pas été concluants, et par manque de temps, aucun test individuel n'a été effectué sur le prototype ESA.

3.4 Conclusion

Le prototype CRAL a permis de montrer la faisabilité de fabrication de slices et de miroirs pupille malgré quelques éclats présents sur les bords des slices. Une amélioration du processus de fabrication a permis d'améliorer la qualité de surface ainsi que le positionnement du centre de courbure sur le prototype ESA. Par manque de temps, les tests individuels au profilomètre n'ont pas pu être améliorés en vue d'une caractérisation des éléments optiques.

4 Assemblage

Après avoir défini les tolérances et aidé à l'amélioration du processus de fabrication, l'activité de R&D entre Cybernétix et le CRAL s'est poursuivie par l'assemblage des composants individuels. Le but de la procédure d'assemblage est de la rendre répétitive et fiable à l'aide de contrôles réguliers à l'interféromètre.

4.1 Technique d'assemblage

Différentes méthodes d'assemblage des optiques sont utilisées :

- Méthode par collage,
- Méthode par contrainte mécanique,
- Méthode par adhérence moléculaire.

La méthode par collage fait appel à diverses colles choisies parmi différentes propriétés telles que la transparence dans le domaine de longueur d'onde, la fluorescence, l'homogénéité, la dilation thermique, l'hydrométrie et la mécanique, la résistance aux UV, la facilité de décollage et d'utilisation. L'inconvénient de cette méthode est que l'épaisseur de colle entre chaque slice est mal maîtrisée. De ce fait, soit il y a une perte de champ, soit, après plusieurs empilements, la surface d'empilage n'est plus plane donc on ne conserve pas la précision d'empilement demandée.

La méthode d'assemblage par contrainte mécanique consiste par des jeux de vis ou des outils mécaniques à exercer une pression sur les éléments afin de les bloquer tous en même temps. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la déformation des surfaces lors du serrage mécanique. Cette technique est souvent appliquée aux assemblages de pièces métalliques.

Les premières applications du collage par adhérence moléculaire à de grandes surfaces sont apparues dans les années 1980 dans les domaines de la microélectronique et des micro-technologies. Le principe de collage par adhérence moléculaire est basé sur la mise en contact direct de deux surfaces, c'est-à-dire sans l'utilisation d'un matériau spécifique (colle, cire, métal à basse température de fusions...). Une telle opération nécessite que les surfaces à coller soient suffisamment lisses, exemptes de particules ou de contamination et qu'elles soient suffisamment rapprochées pour initier un contact, typiquement à une distance inférieure à quelques centaines de nanomètres ($\lambda/4$). Dans ce cas, les forces attractives entre les deux surfaces sont assez élevées pour provoquer l'adhérence moléculaire. Le collage moléculaire est induit initialement par l'ensemble des forces attractives (forces de Wan der Waals¹) d'interaction électronique entre atomes ou molécules des deux surfaces à coller. Ces forces attractives sont d'autant plus importantes que la distance entre les deux surfaces est faible et que la température est élevée. Les avantages de l'adhérence moléculaire sont :

- Aucun espace perdu entre les slices,
- Faible probabilité de désadhérence (désadhérence après application d'une force supérieure à 1.8 daN ce qui correspond à 100 fois les spécifications de l'accélération statique lors du décollage de la fusée [18]),
- Facilité et reproductibilité d'opération.

¹ Forces de Van der Waals : Forces de diverses natures, de faible intensité et dont l'influence diminue rapidement avec la distance (elles sont en $1/r^7$, r étant la distance entre les deux partenaires), entre atomes et molécules neutres (énergie de cohésion de l'ordre de 0.2 eV/atome). La liaison de Van der Waals met en jeu des forces attractives entre dipôles instantanés (dues au déplacement des électrons).

Pour répondre aux cahiers des charges de nos prototypes (spécifications sur l'espace entre les slices – inférieur à 10 μm , les vibrations du lancement, la température et l'humidité), toutes les slices ont été adhérees moléculairement entre elles sous une hotte de classe 100¹. Les paragraphes suivants expliquent le processus d'assemblage par adhésion moléculaire et montrent les différents supports d'adhésion utilisés pendant l'assemblage ainsi que les différents talons tenant les éléments optiques.

4.2 Assemblage et contrôle du prototype CRAL

4.2.1 Processus d'assemblage

4.2.1.1 Miroir découpeur

Le miroir découpeur du prototype CRAL est composé d'un empilement de 11 slices. Un cube de référence dont la géométrie a été contrôlée [14] sert de support aux slices. Le support mécanique utile pendant l'adhérence est constitué de trois tiges amovibles en acier rectifié. Deux tiges sont placées sur la surface arrière de référence de la slice et la dernière sur sa surface latérale.

Le processus d'assemblage est le suivant (Figure 3- 13):

- Nettoyage de la slice n°i et du cube de référence en classe 100,
- Adhésion de la slice n°i sur le cube de référence à l'aide du support mécanique avec les trois tiges,
- La slice adhéree au cube est enlevée du support d'assemblage,
- Contrôle à l'interféromètre de la face arrière et de la face supérieure de la slice adhéree sur le cube,
- Si le résultat est dans les spécifications, on réitère le processus pour la slice n°i+1, sinon on désadhère la slice n°i avec une lame de rasoir et on recommence le processus.

En pratique, pour les mesures interférométriques, nous avons validé l'adhérence moléculaire dès lors que le nombre de franges était inférieur à 20 ce qui correspond à un angle de 1 minute d'arc.

¹ Classe 100 : moins de 100 particules de 0.5 μm par pied cube et aucune de 5 μm

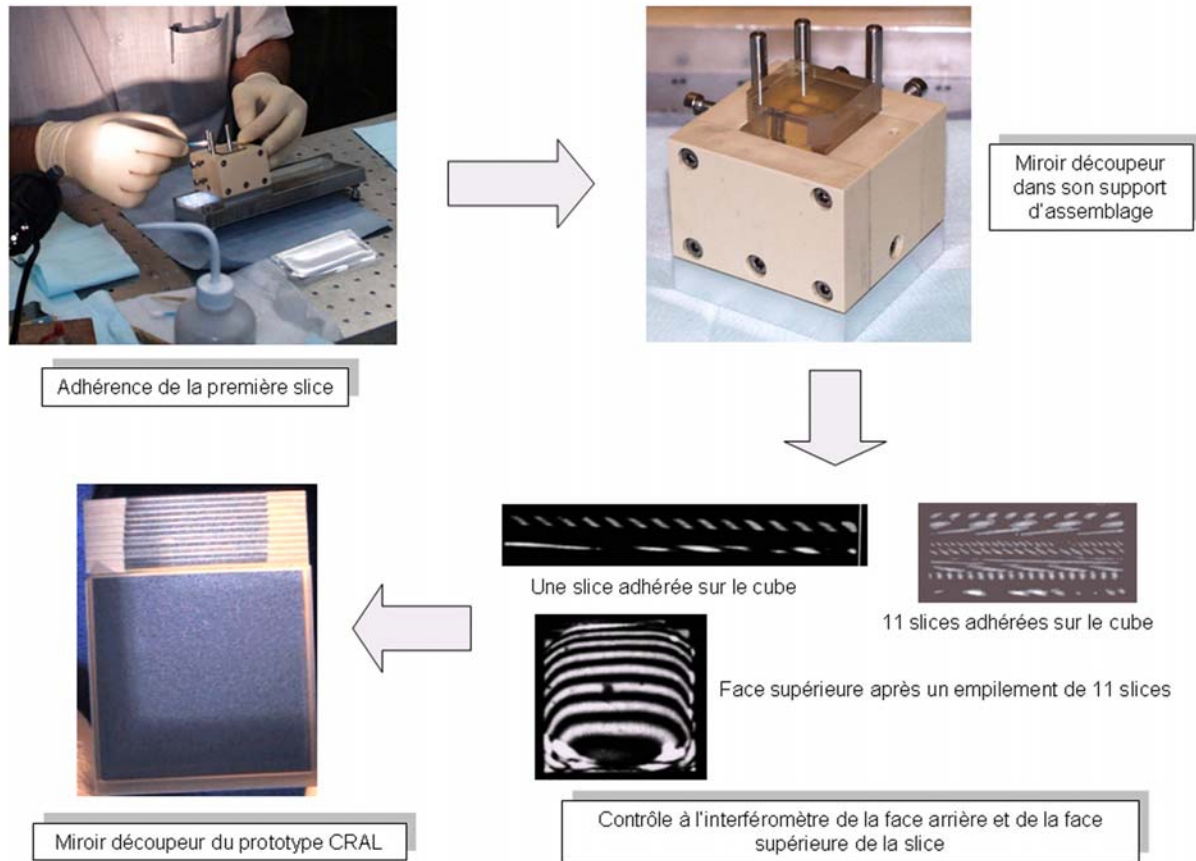


Figure 3- 13 : Processus d'assemblage du miroir découpeur du prototype CRAL

4.2.1.2 Miroirs pupille

Un peigne métallique rétractable après assemblage est utilisé comme référence en position et orientation des miroirs pupille individuels lors de l'adhérence moléculaire sur un barreau de Zérodur placé sur le côté. A l'aide de la machine tridimensionnelle, le peigne a été contrôlé conforme aux spécifications de perpendicularité et d'espacement des dents [15]. Le processus d'assemblage est le suivant (Figure 3- 14) :

- Nettoyage du barreau de Zérodur, des miroirs pupille et du peigne métallique,
- Placement des optiques dans le peigne sur un support d'assemblage,
- Une fois que tous les miroirs pupille sont positionnés, ils sont adhésés ou collés sur le barreau de Zérodur (§ 4.2.2.2).

Contrairement aux slices, aucun contrôle à l'interféromètre n'a été effectué pendant l'assemblage car nous n'avons pas accès aux surfaces d'appui.

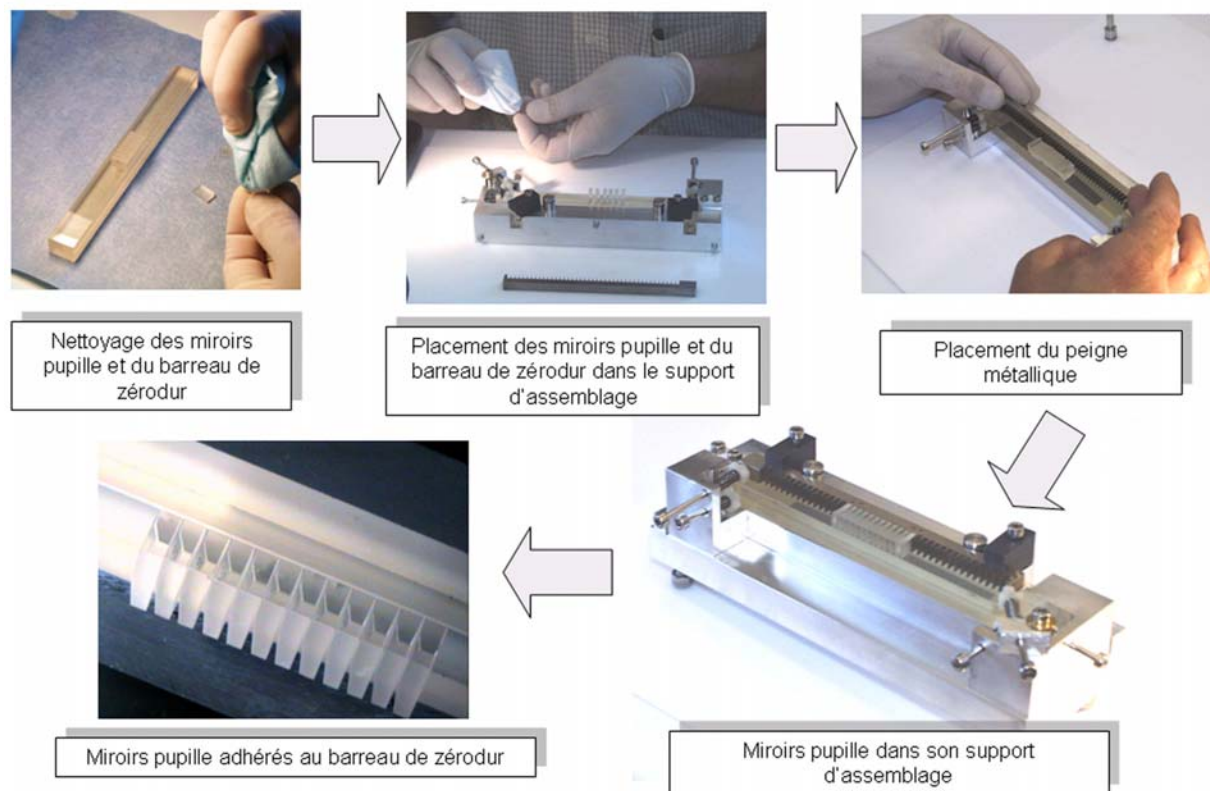


Figure 3- 14 : Processus d'assemblage des miroirs pupille

4.2.2 Processus de contrôle

4.2.2.1 Miroir découpeur du prototype CRAL

Le miroir découpeur est mesuré au profilomètre afin de mesurer le rayon de courbure et les angles relatifs des tilts des slices [19], puisqu'ils n'ont pas pu être vérifiés individuellement. Au terme de ces mesures, on constate que les angles θ_x et θ_y de toutes les slices ne sont pas conformes avec la spécification théorique de $30''$, mais conforme avec le critère de succès que nous nous étions fixés en pratique (1 minute d'arc) pour la fabrication et l'assemblage d'un premier prototype découpeur d'images. Deux erreurs majeures de tilt se distinguent : une autour de l'axe y pour la slice n°16 de 8 minutes d'arc et une autour de l'axe x pour la slice n°22 de 1.7 minutes d'arc. En contrôlant au profilomètre les faces arrière et latérale du miroir découpeur, on s'aperçoit que la slice n°16 est mal assemblée. Suite à une erreur d'interprétation de l'interférogramme des faces arrière lors de l'adhérence moléculaire, le mauvais positionnement de la slice n°16 n'a pu être détecté. Sur les interférogrammes de la face supérieure, on observe une déformation progressive de la surface avec un maximum de $2\lambda/3$ PTV pour la onzième slice (pour une spécification de $\lambda/2$ PTV à $\lambda=0.633 \mu\text{m}$). Pour un empilage supérieur à 10 slices, il faudrait donc repolir la dernière slice adhésée. De plus, on observe une perte d'adhérence dans les coins opposés à la face active des slices. Ceci est dû à un stress trop important du cube par rapport à la pile de slices. Les résultats de ces tests sont présentés sur la Figure 3- 15.

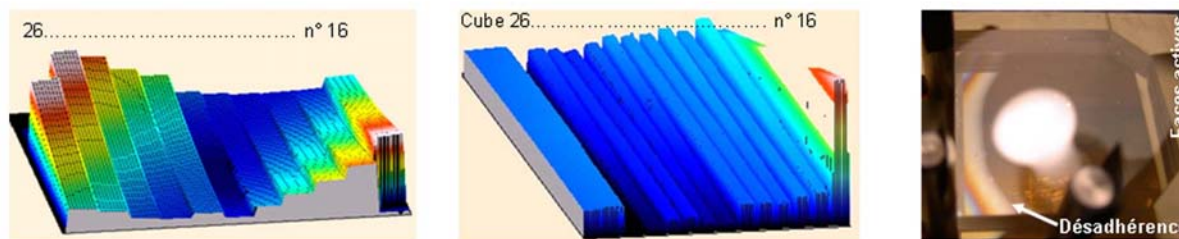


Figure 3- 15 : A gauche : Profil de la face active du miroir découpeur. Au milieu : Profil de la face arrière. A droite : Visualisation de la désadhérence des slices.

4.2.2.2 Miroirs pupille du prototype CRAL

Après assemblage par adhérence moléculaire, la barrette de miroirs pupille a été contrôlée au profilomètre afin de mesurer les tilts [21]. A l'issue de cet assemblage, des erreurs de fabrication des miroirs pupille individuels de l'ordre de 2 minutes d'arc RMS (soit 4 fois la spécification) ont été visualisées suivant θ_x . De plus, les erreurs angulaires suivant θ_y mettent en évidence des défauts non répétables de l'ordre de 20 minutes d'arc RMS (soit 40 fois la spécification). Les dents du peigne n'ont pas joué leur rôle de face d'appui pour le miroir pupille au moment de l'adhérence moléculaire qui est difficilement contrôlable dès lors qu'on l'applique à une petite surface d'adhérence (3×11 mm).

Etant donné la mauvaise qualité de l'assemblage par adhésion moléculaire, un deuxième assemblage a été effectué. Les miroirs pupille sont collés sur le barreau de Zérodur, toujours à l'aide du peigne. Après traitement des données du profilomètre du nouvel assemblage (Figure 3- 16), on peut conclure que ce procédé par collage améliore d'un facteur 7 les erreurs angulaires constatées suivant θ_y . Elles sont de l'ordre de 3 minutes d'arc RMS, et 11 minutes d'arc PTV. Les erreurs angulaires constatées suivant θ_x restent du même ordre qu'avec la méthode d'adhérence moléculaire (environ 3 minutes d'arc RMS, et 8 minutes d'arc PTV). De plus, il n'est pas possible d'évaluer précisément la part des erreurs angulaires suivant θ_y qui est liée à la fabrication du peigne. Tout au plus peut-on estimer qu'elle est au pire du même ordre de grandeur que les erreurs de fabrication des miroirs pupille individuels.

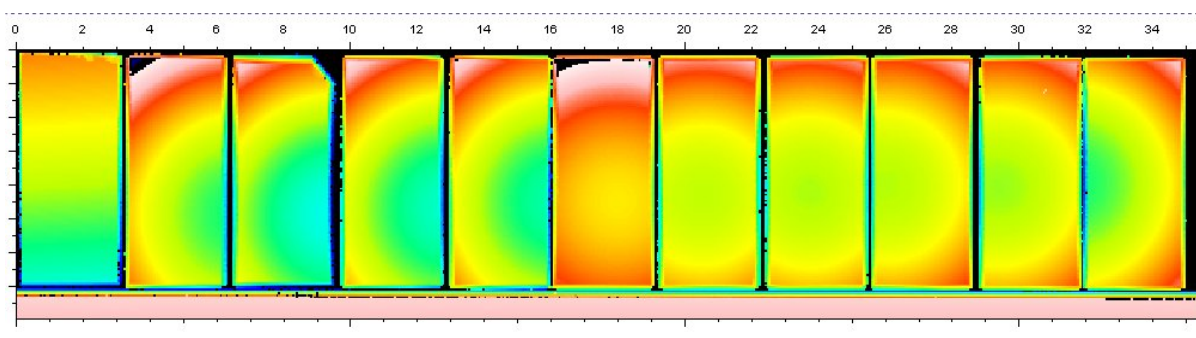


Figure 3- 16 : Profilomètre de la barrette de miroirs pupille

4.3 Assemblage et contrôle du prototype ESA

4.3.1 Processus d'assemblage

4.3.1.1 Miroir découpeur

Le miroir découpeur du prototype ESA consiste en un empilement de 30 slices réparties comme suit : 18 slices ayant une surface active plane puis 10 slices représentatives du prototype ESA et enfin 2 slices planes. En tenant compte de l'expérience acquise sur le prototype CRAL, le processus d'assemblage a été amélioré (Figure 3- 17). Le cube de référence est remplacé par un talon d'épaisseur 10 mm afin de ne pas reproduire la désadhérence sur les coins des slices vue sur le prototype CRAL (Figure 3- 15, à droite). De plus, le processus d'assemblage sur un support mécanique avec trois tiges amovibles a permis d'obtenir un empilage dans les spécifications d'angle de l'ordre de 1'. Pour atteindre des spécifications de 30'', le support mécanique est remplacé par un trièdre en Zérodur. La géométrie de ce dernier est parfaitement connue. A l'intérieur des deux faces du trièdre, trois tiges en Zérodur permettent de venir faire des micro adhérences moléculaires entre le côté de la slice et les tiges. La visualisation des franges de coin d'air entre la tige et la slice donne la connaissance du positionnement de la slice. Lorsqu'on obtient une teinte plate sur les trois tiges, on applique une pression sur la slice pour l'adhérer. On vérifie de nouveau les franges de coin d'air. Grâce à ce procédé, l'assemblage des slices est contrôlé une par une et la slice peut être désadhérée au besoin. De plus, l'assemblage n'est jamais enlevé de son support. Ce trièdre rend l'assemblage reproductible et efficace.

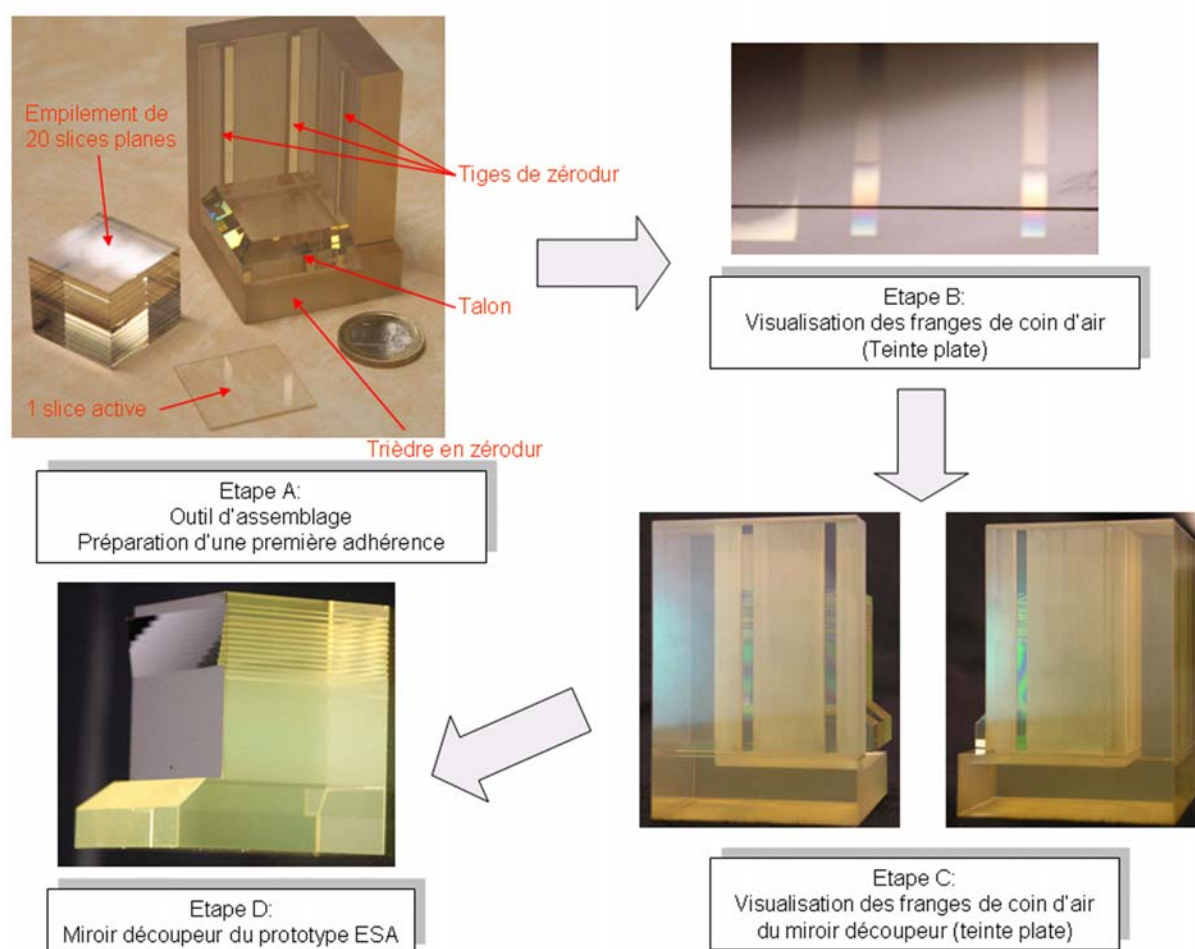


Figure 3- 17 : Procédé d'assemblage du prototype ESA [23]

4.3.1.2 Miroirs pupille et fente

Le concept de peigne de référence utilisé sur le prototype CRAL a été abandonné. Les cinq miroirs pupille et fente sont adhésés entre deux plaques et sur un barreau de Zérodur. L'outil d'assemblage est un rectangle de Zérodur permettant de réaliser les micros adhésances afin de visualiser les franges de coin d'air (Figure 3- 18). L'adhérence se fait entre les miroirs eux-mêmes et le barreau de Zérodur.

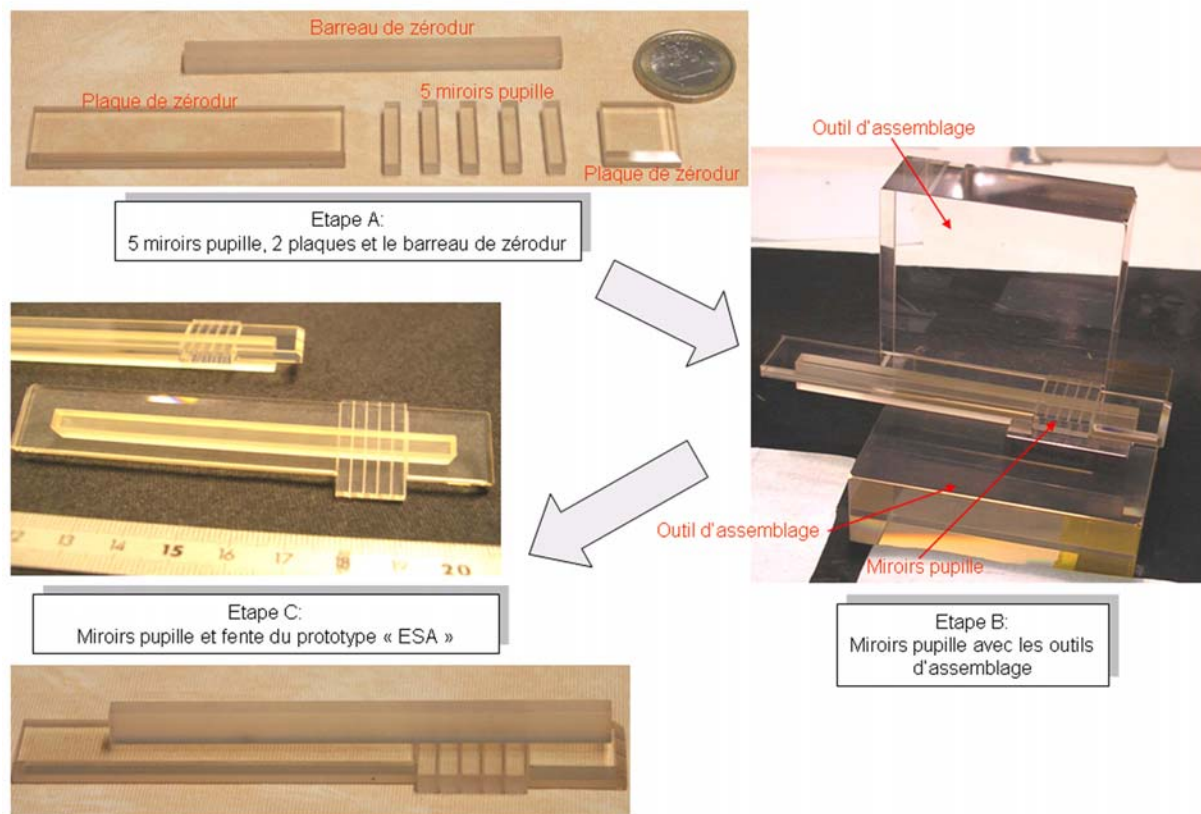


Figure 3- 18 : Processus d'assemblage des miroirs pupille et fente du prototype ESA

4.3.2 Processus de contrôle de l'assemblage

4.3.2.1 Miroir découpeur du prototype ESA

L'assemblage du prototype ESA est contrôlé au fur et à mesure de son avancement. Une mesure profilométrique de l'ensemble des éléments optiques est effectuée.

Concernant le miroir découpeur, les résultats sont les suivants :

- L'erreur de positionnement maximal suivant l'axe x du centre de courbure est de 22 adhésances (± 20 adhésances pour les spécifications). Huit slices sont conformes à la spécification.
- L'erreur de positionnement maximal suivant l'axe y du centre de courbure est de 38 adhésances (± 20 adhésances pour les spécifications). Huit slices sont conformes à la spécification.

En examinant les surfaces de référence arrière et latérale du miroir découpeur, on en déduit la précision de l'assemblage avec le trièdre. Les tilts résiduels sont de ± 2.5 secondes d'arc sur la

surface arrière et ± 5 secondes d'arc sur la surface latérale. Ces résultats montrent l'efficacité de l'assemblage par adhésion moléculaire à l'aide d'un trièdre de qualité optique. Les erreurs constatées sur les composants sont alors des erreurs de fabrication.

4.3.2.2 Miroirs pupille et fente du prototype ESA

Concernant les miroirs pupille et fente, l'erreur de positionnement maximal suivant les axes x et y du centre de courbure est de $7\text{ }\mu\text{m}$ pour une spécification de $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$. Malgré ce positionnement correct, ces barrettes sont fragiles. En effet, lors du transport entre Cybernétix et le LAM, le bord d'un miroir pupille a été cassé. De plus, du aux petites surfaces d'adhérence, la barrette de miroirs pupille s'est désadhérée pendant son intégration dans la structure, lors du serrage mécanique des barrettes qui se fait sur les deux plaques de Zérodur entourant les miroirs. La barrette de miroirs pupille a été réadhérée par Cybernétix afin que les tests à chaud et cryogénique soient réalisés.

Lors d'une phase de mesures complémentaires, pour remédier à ce problème, de nouvelles barrettes de miroirs pupille et fente ont été fabriquées afin de soumettre le prototype aux tests en vibrations. Le processus de fabrication de ces nouvelles barrettes est le suivant (Figure 3-19) :

- Fabrication d'une pièce monolithique en Zérodur de qualité optique en forme de piédestal,
- Adhérence des 15 miroirs – 10 sont inactifs et 5 représentatifs du prototype ESA – sur la partie supérieure de la pièce,

Avec ce nouveau design mécanique, le serrage se fait sur la partie inférieure du piédestal, ce qui élimine les fortes pressions de serrage exercées sur les miroirs de la première barrette. Le prototype a été soumis à des vibrations d'accélération statique de 30G et 20G RMS aléatoire. Le déroulement des essais s'est déroulé sans incident. L'analyse visuelle montre que le prototype n'a subi aucun dommage mécanique [24].

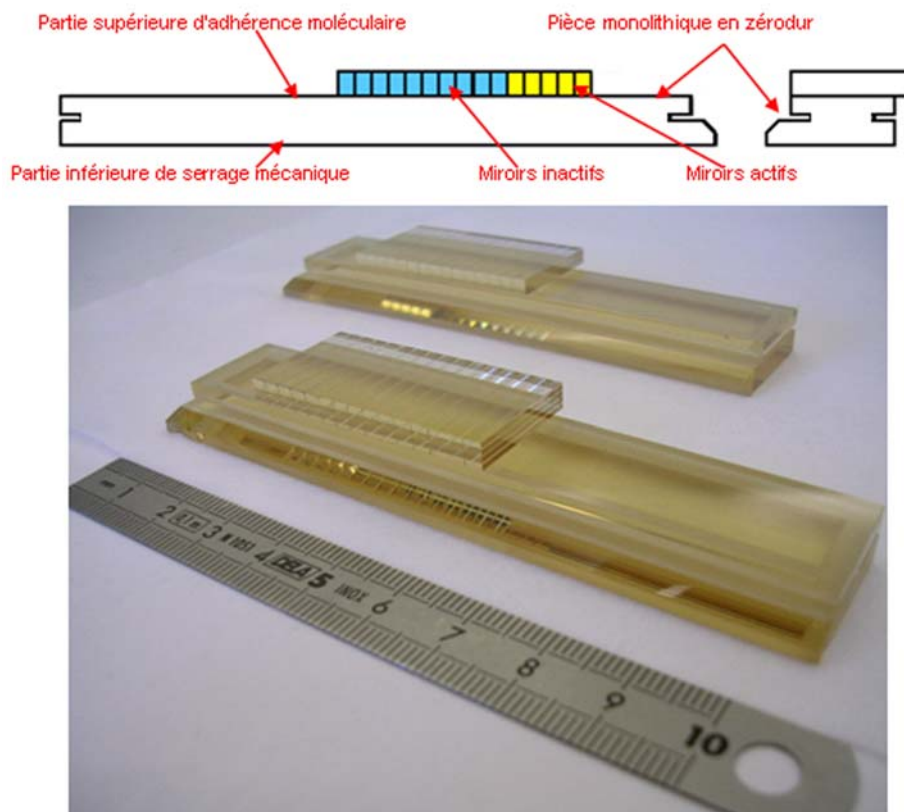


Figure 3- 19 : Procédé d'assemblage des nouvelles barrettes de miroirs pupille et fente du prototype ESA

4.4 Conclusion

Ce paragraphe a montré la progression du travail de R&D sur l'assemblage d'un miroir découpeur entre le CRAL, Cybernétix et le LAM. Passant d'un outil d'assemblage amovible à un outil de qualité optique, l'assemblage a été rendu reproductible avec des erreurs de positionnement inférieures à ± 5 secondes d'arc. De plus, la visualisation des franges de coin d'air permet un contrôle en temps réel sans déplacer le prototype. En revanche, l'assemblage des miroirs pupille et fente est plus délicat puisque les surfaces d'adhérence sont petites. Malgré tout, en terme de positionnement, leurs assemblages sont corrects pour le prototype ESA mais ils restent encore fragiles.

5 Liste des tests

Une fois que les composants individuels (miroir découpeur, miroirs pupille et fente) ont été qualifiés indépendamment au profilomètre, à l'interféromètre ou à la machine tridimensionnelle, un banc optique de tests a été installé au laboratoire optique du CRAL. Pour ce faire, le laboratoire séparé de l'extérieur par un sas d'entrée a été mis en surpression et s'est équipé d'une hotte à flux laminaire de classe 1000¹. Le banc de tests est installé sous celle-ci.

Pour les deux prototypes CRAL et ESA, relatifs à l'instrumentation du JWST, la philosophie des tests à température ambiante et dans le visible est identique. Elle suit la méthodologie de tests décrite au Chapitre 2, c'est-à-dire que le prototype de découpeur d'images est monté étape par étape, en fonction des différents plans observés. Une première série de mesures est faite dans le plan des pupilles intermédiaires. A partir de ces mesures, les erreurs de fabrication et d'assemblage du miroir découpeur ainsi que la géométrie des pupilles intermédiaires sont calculées. Dans le plan de la pseudo fente, le positionnement des fentes donne les angles des miroirs pupille. De plus, la géométrie des fentes valide le grandissement du système. Des mesures de qualité image (PSF) sont également faites dans ce plan. Enfin, dans le plan de la pupille de sortie, les dimensions permettent d'estimer le nombre d'ouverture de sortie du système. Tous les tests effectués sur les deux prototypes sont résumés dans le Tableau 3- 3. Pour le prototype ESA, les tests dans le plan de la pseudo fente sont répétés à température cryogénique (§ 6.2.5). La préparation des tests est un travail long passant par l'élaboration d'un plan de tests et d'une procédure d'alignement.

Le banc de tests est équipé d'un module d'illumination et de détection. Chacun d'eux est adapté au prototype en cours de mesure. Le module d'illumination reproduit le nombre d'ouverture d'entrée du système au moyen d'un masque pupille placé au bon endroit, et image le plan focal du télescope sur le miroir découpeur. Le module de détection est équipé d'une optique de relais qui image le plan étudié sur une caméra CCD. L'optique de relais est adaptée aux différents tests. Elle peut être composée d'une lentille simple, d'un doublet, d'un objectif de microscope et d'un objectif photographique, voire de combinaisons de ces derniers.

Les plans de test du prototype CRAL [25] et ESA [26] sont très détaillés. Ils expliquent notamment :

- La liste des tests à réaliser,

¹ Classe 1000 : moins de 1000 particules de 0.5 μm par pied cube et moins de 7 de 5 μm .

- La description du prototype, des modules d'illumination et de détection (alignement, mise au point, calibration, matériels nécessaires),
- La description individuelle des tests (but, implémentation du banc, valeurs théoriques avec leurs tolérances, moyens nécessaires, procédures),
- Le planning.

Des procédures d'alignement du banc optique, mettant en jeu des outils tels que des lasers, théodolite ou machine tridimensionnelle pour un pré alignement mécanique, viennent compléter les plans de tests afin de les réaliser au mieux ([27] et [23]).

| Plan de mesures | | | | | | | |
|--|---|--|--|--|---|------------------------------|----------------------------------|
| SPECIFICATIONS | | Plan des pupilles intermédiaires | | Plan de la pseudo fente | | Plan de la pupille de sortie | |
| | | Prototype CRAL | Prototype ESA | Prototype CRAL | Prototype ESA | Prototype CRAL | Prototype ESA |
| Positionnement des pupilles intermédiaires | Dimensions des pupilles intermédiaires | Comparaison avec la modélisation 2% suivant x et y | Comparaison avec la modélisation 1% suivant x 2% suivant y | | | | |
| | Angles θ_x et θ_y des slices | Valeurs individuelles $\pm 1'$ But (Valeurs individuelles $\pm 30''$) | Valeurs individuelles $\pm 30''$ | | | | |
| Grandissement du système | | | | 0.148 ± 0.001 | 0.094 ± 0.001 | | |
| Dimensions des mini fentes | | | | Comparaison avec la modélisation 1% suivant x 2% suivant y | Suivant x: 2.53 ± 0.03 mm Suivant y: 80 ± 2 μ m | | |
| Qualité Image (PSF) | | | | 80% d'énergie dans un cercle de 66.5 μ m de diamètre | 80% d'énergie dans un rectangle de 46 ± 5 μ m de côté | | |
| Positionnement des mini fentes | Positionnement des mini fentes | | | Au centre des miroirs pupille ± 100 μ m | Suivant x: 1380 ± 50 μ m Suivant y: 220 ± 50 μ m | | |
| | Angles θ_x et θ_y des miroirs pupille | | | Valeurs individuelles $\pm 1'$ But (Valeurs individuelles $\pm 30''$) | Valeurs individuelles $\pm 30''$ | | |
| Dimensionnement de la pupille de sortie | | | | | | | Données Zemax $\pm 1\%$ |
| | | | | | | | Valeurs individuelles $\pm 30''$ |

Tableau 3- 3 : Liste des tests sur banc optique appliquées aux prototypes CRAL et ESA

6 Résultats et Comparaisons

Que se soit pour le prototype CRAL ou ESA, les tests effectués à l'Observatoire de Lyon suivent le plan de test précédemment défini. Ce paragraphe donne les résultats des deux prototypes avec leurs interprétations et comparaisons ainsi que les améliorations possibles à apporter.

6.1 Prototype CRAL

6.1.1 Plan des pupilles intermédiaires

Le but de ce test est de connaître le positionnement relatif des pupilles intermédiaires afin de calculer les angles des slices. De plus, la géométrie des pupilles sera comparée aux prévisions de la modélisation du Chapitre 2. Les résultats présentés ci-dessous sont donnés par le compte rendu des tests dans le plan des miroirs pupille [28].

Etant donné que le miroir découpeur n'est pas traité et connaissant la courbe de transmission du Zérodur, tous les tests ont été effectués à 365 nm afin d'éviter les réflexions parasites sur les faces arrière du miroir découpeur. Toutes les images brutes sont corrigées des calibrations de la caméra (flat, dark et biais) et de la détection. La Figure 3- 20 représente les 11 images de la pupille du télescope dans le plan des pupilles intermédiaires.

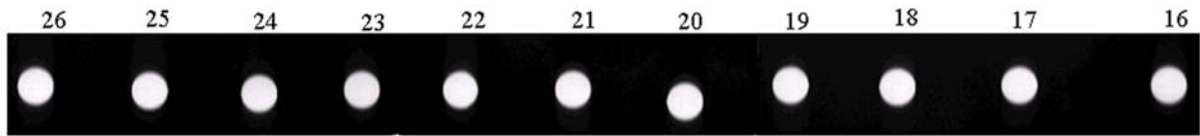


Figure 3- 20 : Ligne des pupilles intermédiaires

La Figure 3- 21 illustre les erreurs angulaires des slices. En effet, à partir du positionnement du centroïde de chaque pupille intermédiaire, l'erreur angulaire sur les slices est connue par les relations suivantes :

$$\Delta\theta_y = \frac{3600.180}{2.\pi} .a \sin\left(\frac{\Delta x}{D}\right) \text{ et } \Delta\theta_x = \frac{3600.180}{2.\pi} .a \sin\left(\frac{\Delta y}{D}\right)$$

Équation 15

Où $(\Delta x, \Delta y)$ est le décalage de la position du centroïde de la pupille intermédiaire suivant les axes x et y et D est la distance entre la slice et son miroir pupille associé.

Les écarts angulaires des slices autour des axes x et y sont inférieurs à la spécification de 1 minute d'arc sauf pour la slice n°20 où l'angle θ_x atteint 2.1' et pour la slice n°16 où l'angle θ_y atteint 7.4' (Figure 3- 21). La précision de mesure du centroïde est estimée à un pixel CCD, soit 9 adhérences ce qui correspond à un angle de 3''. Grâce à la mesure des surfaces latérales et arrière du miroir découpeur [20], on a vérifié que la slice n°16 présente une erreur d'assemblage et la slice n°20 révèle une erreur de fabrication (l'angle θ_y résulte des erreurs de fabrication et d'assemblage, tandis qu'on peut considérer que les écarts sur l'angle θ_x sont principalement dus à des erreurs de fabrication). Concernant l'angle θ_x , 8 slices sur 11 présentent une erreur inférieure à 30'' ce qui est encourageant pour la fabrication de futurs prototypes. Un effort doit cependant être fait sur le processus d'assemblage afin de diminuer l'écart sur l'angle θ_y .

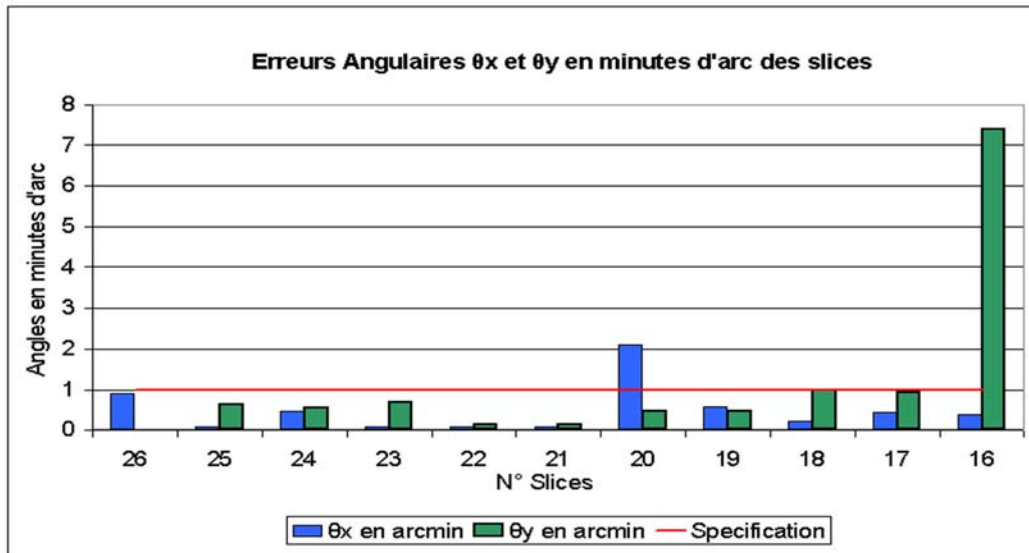


Figure 3- 21 : Erreurs angulaires sur les slices

Concernant la comparaison entre les mesures effectuées au profilomètre et celle faites au laboratoire optique, ces dernières sont légèrement plus précises. En moyenne, on observe une différence entre les deux mesures au maximum de 0.5' pour les angles θ_x et θ_y . Si la précision demandée sur l'angle est supérieure à la valeur ci-dessus, on peut se contenter des mesures du profilomètre qui sont plus rapides (une journée contre une semaine pour la mesure en laboratoire).

La comparaison entre les coupes suivant les axes x et y de la pupille intermédiaire mesurée et celles du modèle de diffraction présenté au Chapitre 2 montre le dimensionnement correct du miroir découpeur en terme de grandissement (Figure 3- 22). En effet, l'écart de FWHM entre les mesures et la simulation suivant les deux axes x et y est inférieur à 13 adhérences (soit 1.3% par rapport au diamètre de la pupille théorique).

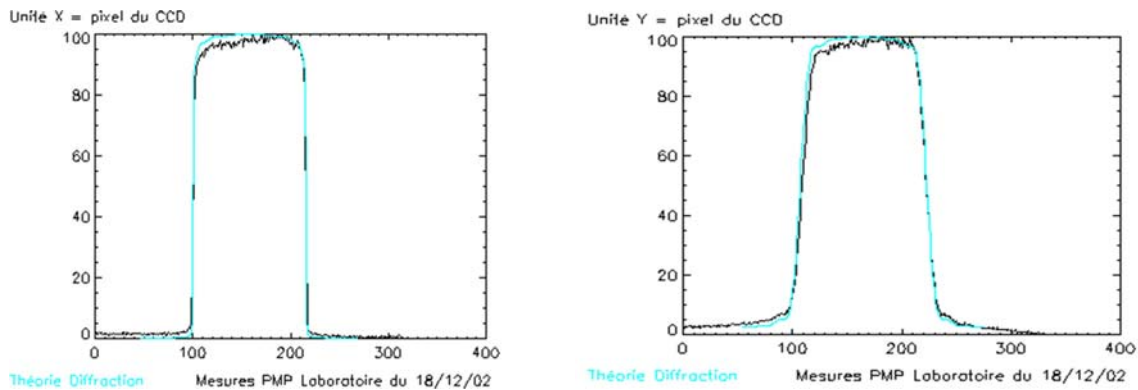


Figure 3- 22 : Coupe d'une pupille intermédiaire. A gauche : Suivant l'axe x. A droite : Suivant l'axe y

6.1.2 Alignement des mini fentes

Le but de ce test est de connaître le positionnement suivant les axes x et y des mini fentes. De plus, il permet de valider le grandissement d'un système découpeur d'images via la mesure de la longueur et de la largeur de chaque fente. Les résultats présentés ci-dessous sont extraits du compte rendu des tests dans le plan des miroirs fente [29].

La pseudo fente présentée sur la Figure 3- 23 est composée de 10 fentes puisque la barrette de miroirs pupille est constituée de 10 éléments. L'acquisition a été effectuée à 365 nm et a été corrigée des calibrations de détection et de caméra.



Figure 3- 23 : La pseudo fente composée de 10 mini fentes

L'erreur angulaire sur l'angle θ_x de chaque miroir pupille est inférieure à 4 minutes d'arc sauf pour les miroirs pupille n°26 (6.3') et n°25 (-6.3'). Ceci est dû à un décolage partiel de ces miroirs pupilles lors du nettoyage de la barrette à l'aide d'une bombe d'air. L'erreur angulaire sur l'angle θ_y est inférieure à 3.5 minutes d'arc sauf pour le miroir pupille n°20 qui atteint 7.5 minutes d'arc (Figure 3- 24). Les tolérances sur les angles des miroirs pupille ne sont pas atteintes : ceci est dues à la difficulté d'assemblage de la barrette. Globalement, l'erreur de position en x et en y du centroïde de chaque fente est inférieure à 100 adhérences sauf en x pour le centroïde correspondant au miroir pupille n°20 et en y pour le centroïde correspondant aux miroirs pupille n°25 et 26. Malgré tout, les fentes n°19 et n°20 ne se chevauchent pas. Bien que les miroirs pupille soient hors spécifications, toutes les fentes tomberaient sur leurs miroirs fentes correspondants et ce prototype aurait pu être intégré dans un véritable instrument.

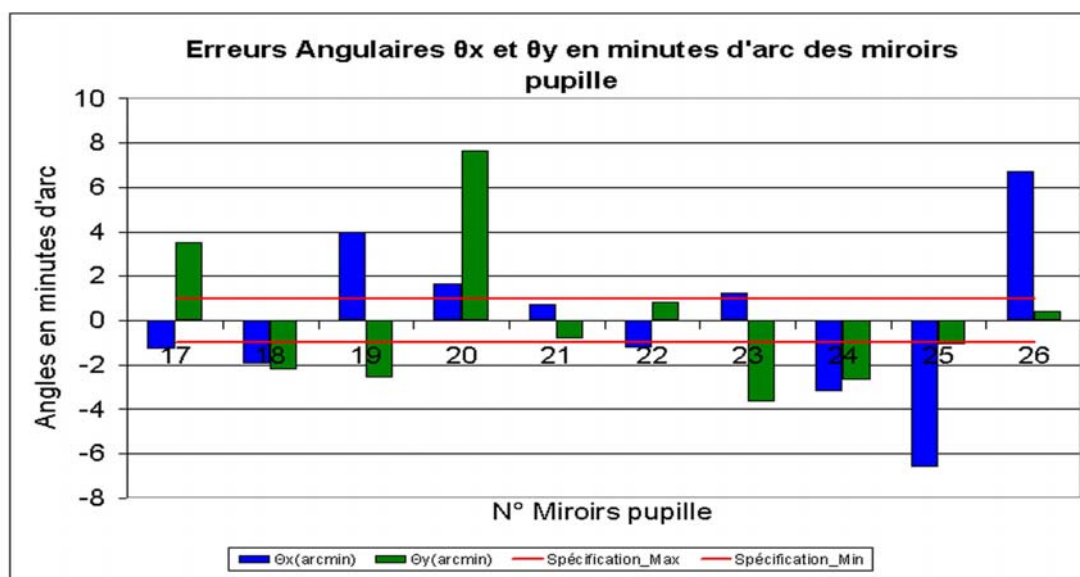


Figure 3- 24 : Angles des miroirs pupille en minutes d'arc

La comparaison entre les données du profilomètre et celles des mesures en laboratoire montre un écart de 1.7 minutes d'arc entre les deux mesures. On ne peut pas se contenter de la mesure du profilomètre qui est peu précise pour connaître la valeur des angles. En effet, le manque de fiabilité du profilomètre est dû à une trop grande surface à mesurer, ce qui entraîne des temps de mesure trop longs et de l'instabilité du profilomètre. La mesure dans le plan de la pseudo fente est indispensable.

La FWHM suivant l'axe x de chaque fente a été mesurée conforme à la spécification de grandissement (Figure 3- 25). En effet, chaque fente mesure 2.80 ± 0.02 mm. En revanche, la FWHM suivant l'axe y est inférieure à la spécification de 0.133 ± 0.002 mm. On observe une erreur de 15 adhérences sur la largeur de la fente. Ceci est probablement dû à l'utilisation d'un grandissement du système de détection trop faible, qui ne permet pas d'atteindre la précision

demandée. De plus, des irrégularités d'éclairement sont présentes sur l'image des slices qui sont dues à une accumulation de poussières sur le miroir découpeur.

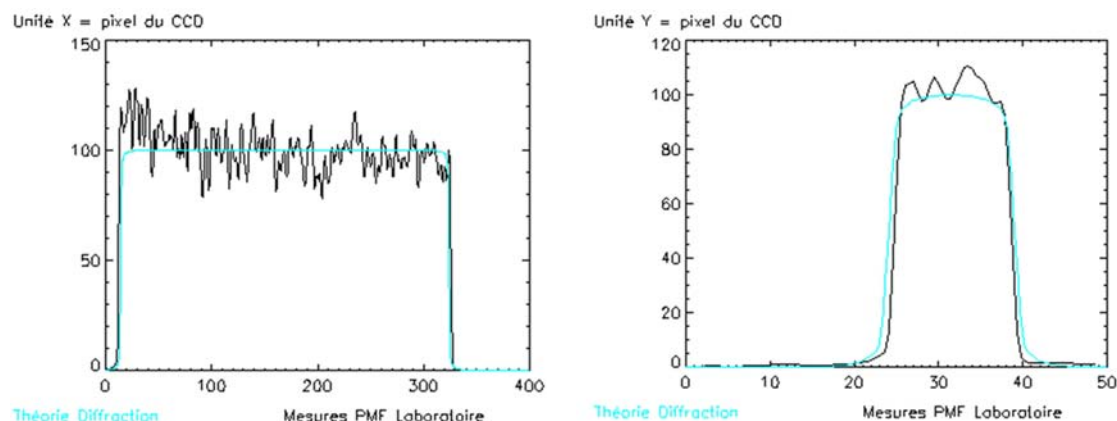


Figure 3- 25 : Coupe d'une fente. A gauche : Suivant l'axe x. A droite : Suivant l'axe y.

6.1.3 Qualité image du prototype CRAL

Le but de cette mesure de PSF est de quantifier le pourcentage d'énergie présent au niveau d'un échantillon spatial sur le CCD. Un trou de 10 adhérences de diamètre est placé dans le plan focal du télescope. Ce trou est 7 fois plus petit que le diamètre de la tache d'Airy¹ au niveau du plan de la pseudo fente. En optique, on prend généralement, un trou objet 10 fois plus petit que la tache d'Airy donnée par le système. La valeur de 10 adhérences a été choisie pour maximiser le flux afin de rendre les poses de PSF plus courtes (600 secondes en moyenne). Toujours pour maximiser le flux, les acquisitions ont été faites à 577 nm. Neuf PSF réparties à l'extrémité des slices et du miroir découpeur ont été acquises (Figure 3- 26, à gauche). Les données brutes des PSF sont présentées sur la Figure 3- 26 (au milieu et à droite).

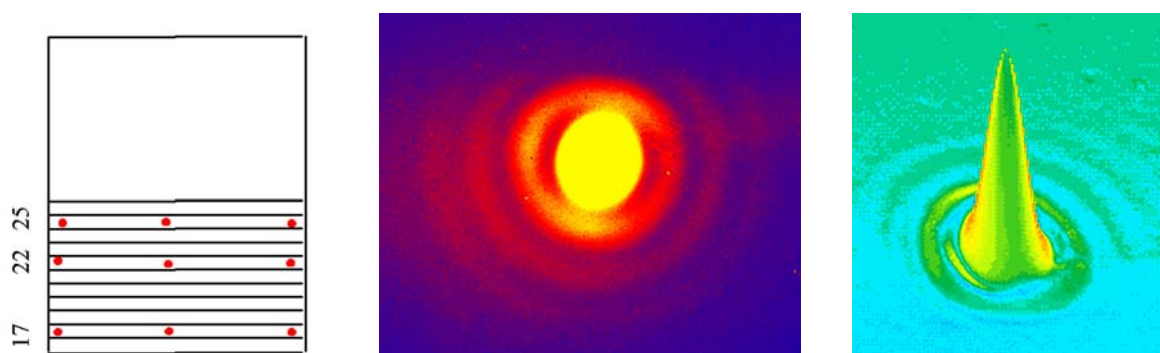


Figure 3- 26 : A gauche : Répartition des PSF acquises sur le miroir découpeur. Au milieu : Acquisition d'une PSF. A droite : PSF en 3D.

Le long temps de pose introduit un niveau de bruit non négligeable pour le calcul de l'énergie encerclée. Toutes les PSF contiennent 80% d'énergie encerclée dans un diamètre allant de 50

¹ Diamètre de la tache d'Airy donné par un système optique.

$$D_{Airy} = \frac{2.44\lambda f}{a}$$
 où f est la distance entre l'ouverture diffractante et le plan d'observation et a le diamètre de l'ouverture diffractante.

à 73 adhérences L'énergie contenue dans la PSF est plus étalée aux extrémités du miroir découpeur. La FWHM des PSF varie de 22 à 25 adhérences de diamètre pour une valeur théorique de 25 adhérences (calculée à l'aide du modèle numérique IDL). Globalement, ces mesures de PSF montrent que la qualité image d'un système découpeur d'image est correcte. La Figure 3- 27 montre les courbes d'énergie encerclée correspondant à la mesure en laboratoire et à la simulation IDL.

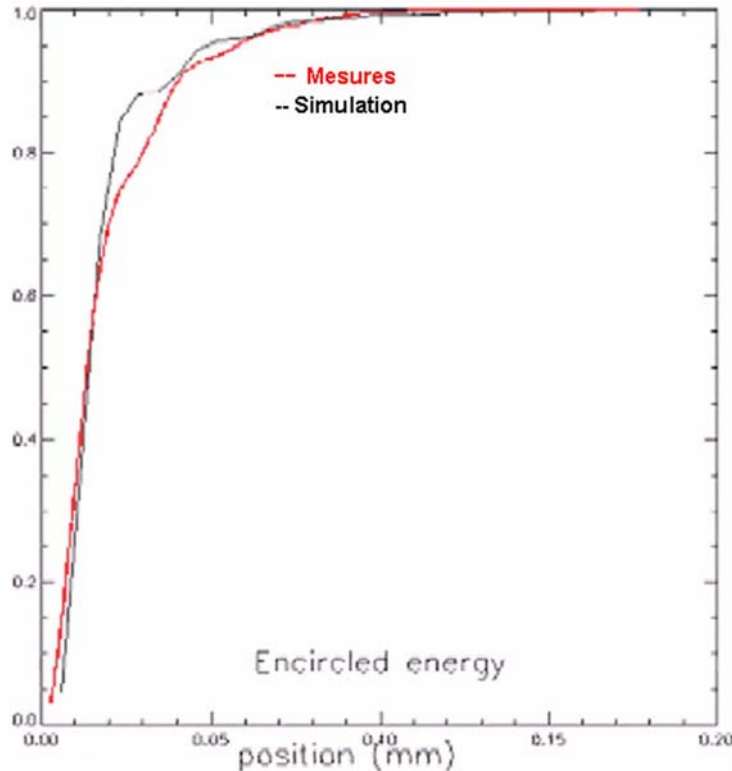


Figure 3- 27 : Courbes d'énergie encerclée pour la PSF du prototype CRAL

L'image du trou dans le plan focal du télescope est ensuite déplacée de sorte qu'il se trouve entre les slices n°22 et 23. Dans le plan de la pseudo fente, la PSF est coupée en deux parties par le miroir découpeur (Figure 3- 28). Avec la connaissance des positions relatives des fentes et après soustraction du bruit, la PSF peut être reconstruite.

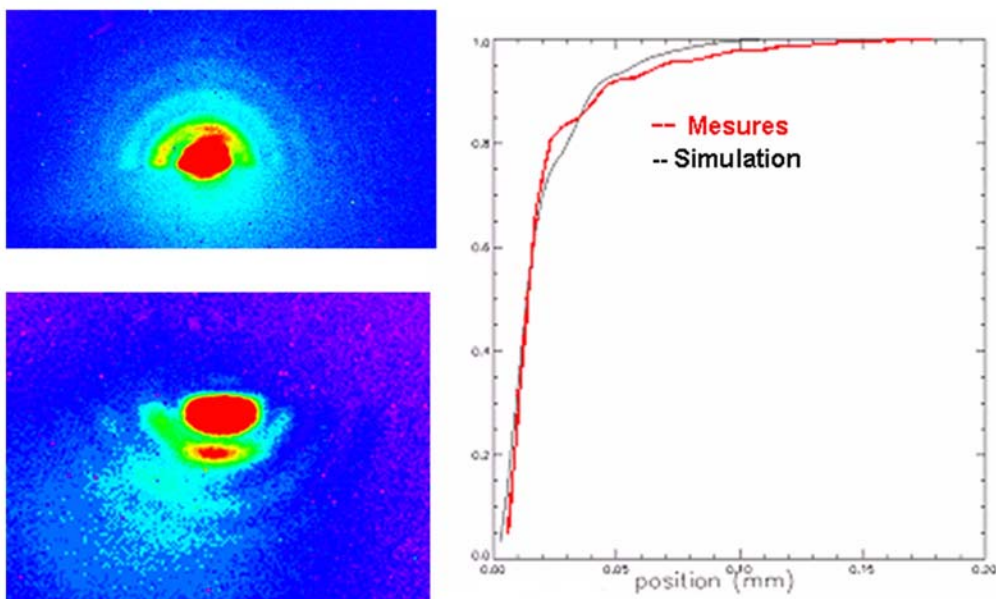


Figure 3- 28 : Acquisition d'une PSF coupée par deux slices. A gauche : Images de la PSF coupée. A droite : Courbes d'énergie encerclée de la PSF reconstruite.

6.1.4 Conclusion

Malgré quelques erreurs d'angles sur les slices ou les miroirs pupille du prototype CRAL, toutes les images tombent sur leurs miroirs correspondants. De plus, aucun chevauchement de fente dans le plan objet du spectrographe ne se produit et le système découpeur d'image présente une qualité d'image correcte. Tous ces tests, individuels ou sur banc optique, ont permis de valider le prototype CRAL. Pour la qualification d'un prototype de miroir découpeur en technologie verre, les résultats sont encourageants. Toutefois, l'assemblage des miroirs pupille est à améliorer ainsi que les mesures au profilomètre des éléments individuels.

6.2 Prototype ESA

Les résultats de tous les tests individuels, sur banc optique à température ambiante et cryogénique, et en vibrations sont répertoriés dans le rapport de tests du prototype ESA [23].

6.2.1 Intégration du prototype

L'intégration des éléments dans la structure mécanique du prototype ESA se fait à l'aide d'une machine tridimensionnelle. La structure mécanique est alors parfaitement caractérisée avec une précision de ± 5 adhérences Il en est de même pour les trois unités optiques. Des cales de 10, 30, 50, 100 ou 500 adhérences sont insérés dans la structure mécanique afin de corriger les erreurs de fabrication (Figure 3- 29).

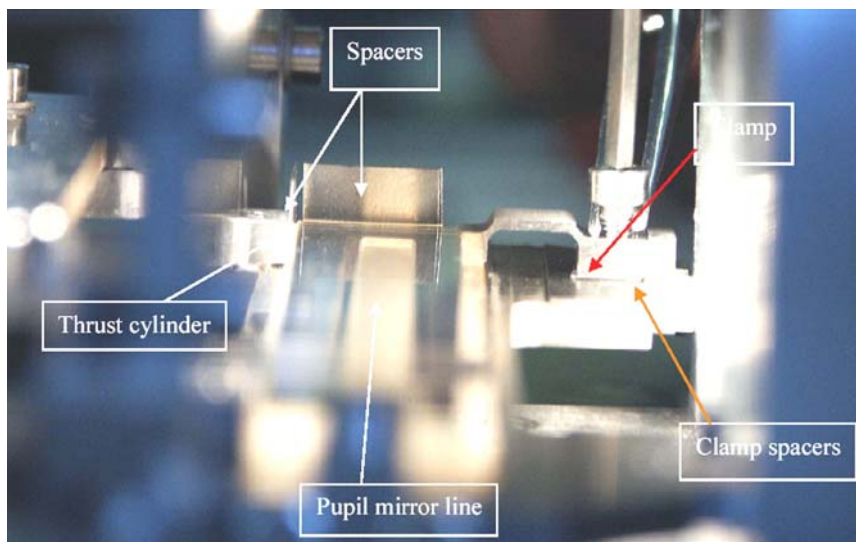


Figure 3- 29 : Illustration des insertions de cales entre la structure mécanique et les optiques

6.2.2 Plan des pupilles intermédiaires

Cette mesure est un test d'intégration. Elle a pour but d'ajuster le positionnement suivant les axes x et y et autour de z de la pupille du télescope afin que son image soit centrée sur les miroirs pupille. De plus, ce test permet de connaître la forme de l'image de la pupille du télescope, sa position sur les miroirs pupille et ainsi les erreurs relatives de tilt sur le miroir

découpeur. La Figure 3- 30 montre les images de la pupille du télescope centrées sur leurs miroirs pupille. On remarque que le miroir pupille n°23 a été cassé durant le transport.

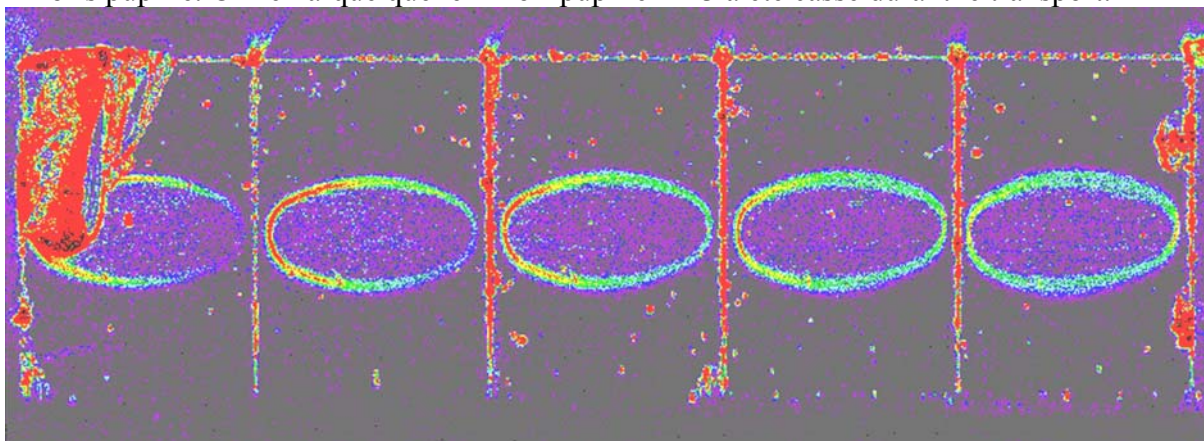


Figure 3- 30 : Images de la pupille du télescope centrées sur leurs miroirs pupille

Après traitement, l'erreur de centrage absolue de l'image sur son miroir pupille est au maximum de $\pm 40 \mu\text{m}$ suivant les deux axes x et y. Ceci équivaut à une erreur maximale d'angle de $27.5''$ sur les slices, conforme à la spécification de $30''$. La mesure de positionnement est trois fois meilleure que les résultats de l'analyse de tolérances préliminaires [31]. Ceci prouve l'excellente fabrication et assemblage du miroir découpeur.

6.2.3 Plan de la pseudo-fente

6.2.3.1 Alignement et caractéristiques

Ce test consiste à observer simultanément les cinq fentes sur leurs miroirs fente. Le but est de déterminer le positionnement de chaque fente et de détecter le possible chevauchement entre elles. Les acquisitions sont faites en éclairant le miroir découpeur uniformément et avec un filtre passe bas à 600 nm. La position de la barrette de miroirs fente est ajustée en centrant chaque fente sur son miroir. Un compromis a été établi entre la précision de centrage des fentes et le nombre d'itérations de manipulations de centrage afin de minimiser les risques de détériorations des miroirs. La Figure 3- 31 représente l'acquisition brute des cinq fentes sur les miroirs fente.

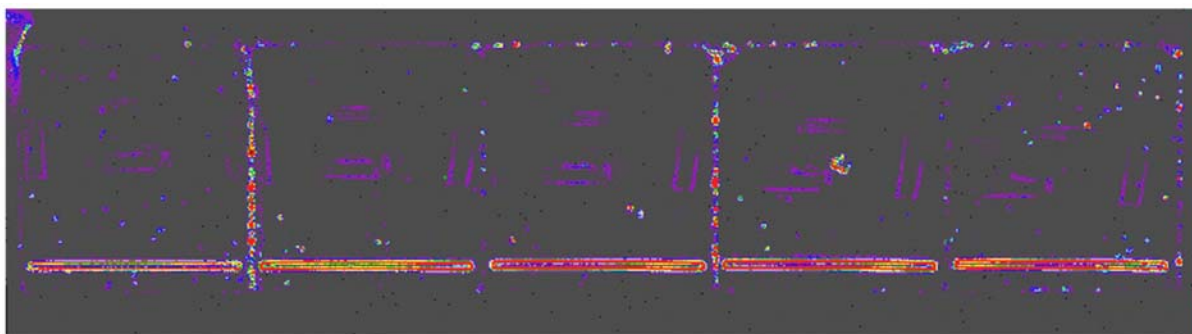


Figure 3- 31 : Cinq mini fentes sur leurs miroirs fente

L'espace entre chaque fente est en moyenne de $250 \mu\text{m}$. Le positionnement relatif suivant les axes x et y de chaque fente est inférieur à $\pm 9 \mu\text{m}$ signifiant une erreur sur les angles de l'ordre de la minute d'arc, compatible avec la spécification de 2.8 minutes d'arc. Là encore, la fabrication et l'assemblage des miroirs pupille ont été très rigoureuses et répondent aux spécifications. La FWHM de la longueur de la fente varie entre 2489 à $2509 \mu\text{m}$ avec une

précision de mesure de $\pm 10 \mu\text{m}$. Avec cette barre d'erreur, elle est conforme aux spécifications.

Pour mesurer précisément la largeur de la fente avec la précision requise, on utilise un objectif de microscope afin d'imager une seule fente sur le détecteur. L'image d'une fente individuelle est présentée sur la Figure 3- 32.

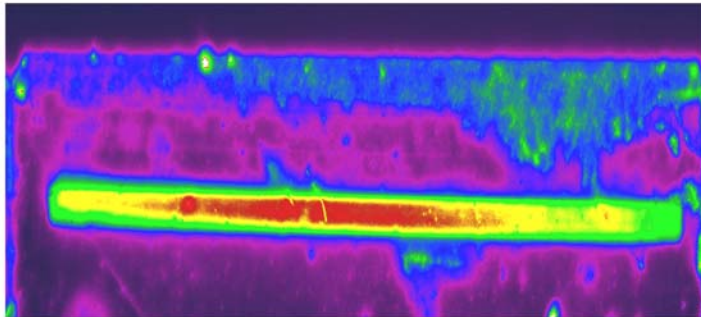


Figure 3- 32 : Fente individuelle (n°22)

Après traitement, la largeur FWHM moyenne est de $77 \pm 2 \mu\text{m}$. Avec cette barre d'erreur, la FWHM de la largeur est conforme aux spécifications ($80 \pm 2 \mu\text{m}$). De plus, ce test nous apporte la connaissance du positionnement absolu des fentes par rapport à leurs miroirs fente. Le positionnement suivant l'axe y est hors spécifications avec un décalage à sa position théorique de $128 \mu\text{m}$. Ceci n'a pas de réelle conséquence sur les performances optiques du système puisque c'est l'axe de dispersion sur le CCD. Un ajustement mécanique aurait dû être nécessaire si cette erreur avait été détectée en cours de mesure.

6.2.3.2 Qualité image

Ce test de qualité image consiste à regarder la PSF de la conjugaison slice – fente réalisée par les miroirs pupille. Une grille de trous de $10 \mu\text{m}$ est placée dans le plan focal du télescope de manière à placer six PSF sur les 2/3 de la slice. Les tests sont faits en lumière monochromatique à 577 nm . Les résultats de la Figure 3- 33 représentent une PSF sur le miroir fente n°21.

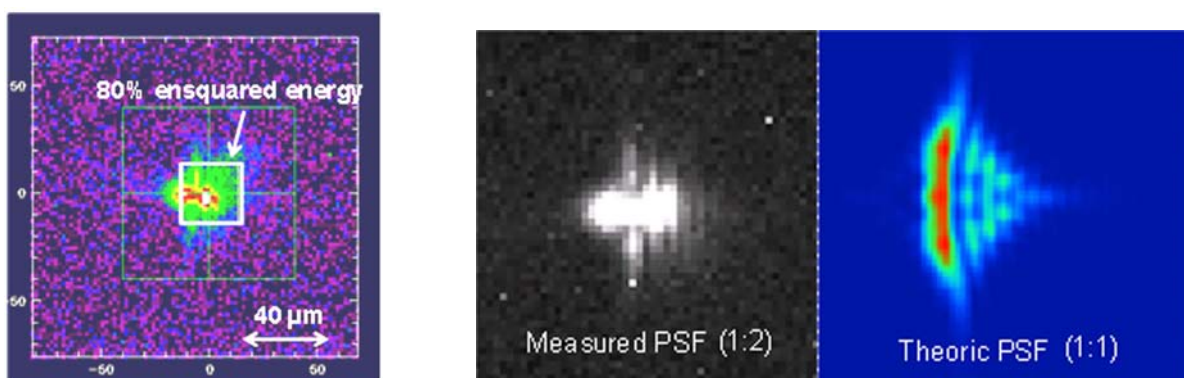


Figure 3- 33 : A gauche : PSF mesurée. A droite : Comparaison entre une PSF mesurée et théorique calculées avec Zemax.

Sur la Figure 3- 33, le carré blanc est le carré contenant 80% d'énergie. Au meilleur focus et pour toutes les PSF, 80% de l'énergie est encadrée dans un diamètre allant de 25 à $40 \mu\text{m}$ (Figure 3- 35), ce qui est en accord avec la spécification de 80 % d'énergie dans un diamètre de $46 \mu\text{m}$. La Figure 3- 34 est une illustration de la coma et de l'astigmatisme mesurés et

prédits par Zemax hors focalisation. La Figure 3- 35 montre la courbe d'énergie encerclée mesurée sur le prototype ESA et la courbe simulée sous Zemax.

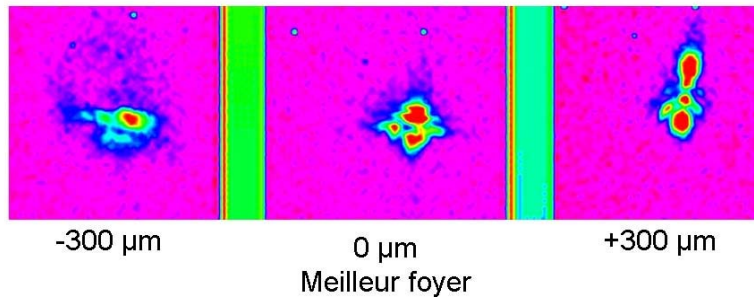


Figure 3- 34 : Evolution de la PSF au voisinage du plan image

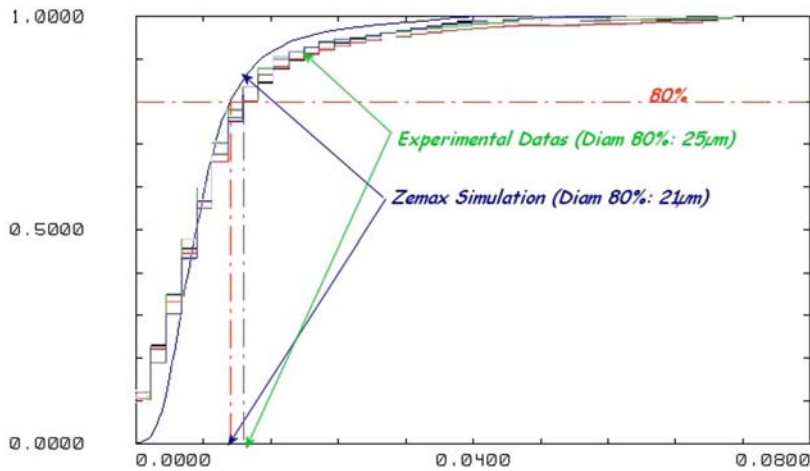


Figure 3- 35 : Comparaison des courbes d'énergie encerclée pour une PSF mesurée et théorique

6.2.4 Plan de la pupille de sortie

Le but de ce test est de vérifier la dimension de la pupille de sortie globale, que les miroirs fente envoient à l'infini (système télécentrique). Une optique de relais image la pupille de sortie sur le détecteur. Toutefois, la pupille globale n'a pu être mesurée puisque pour des questions de coût, les miroirs fente n'ont pas de tilt. Il n'existe pas de pupille unique à l'infini et seules les pupilles individuelles sur le centre et les deux extrémités du champ ont été acquises. La Figure 3- 36 montre la pupille de sortie donnée par la configuration n°21 qui consiste en une superposition des trois pupilles provenant des trois champs.

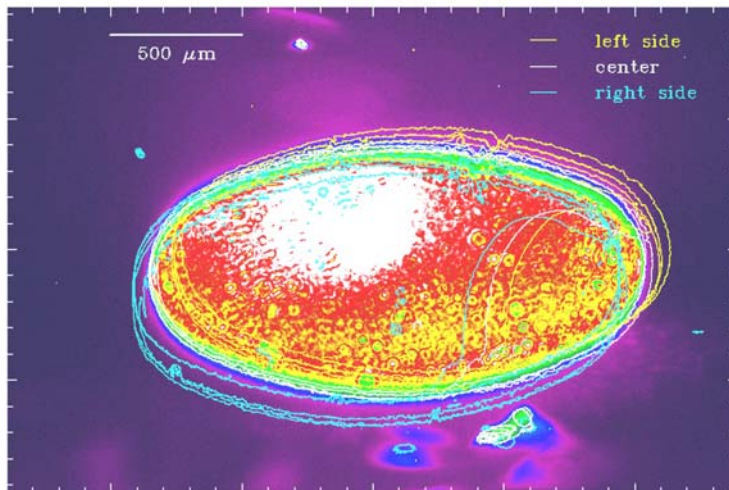


Figure 3- 36 : Pupille de sortie de la configuration n°21 pour trois points du champ

En comparant les résultats avec ceux donnés par Zemax, le nombre d'ouverture de sortie du système découpeur est conforme à la spécification.

Une fois que les tests à température ambiante et dans le visible ont été achevés, et ont donné satisfaction du point de vue de l'alignement des fentes et de la qualité image, une série de tests dans le visible mais à température cryogénique s'est déroulé pendant un mois à l'Université de Durham (UK).

6.2.5 Tests en environnement cryogénique du prototype ESA

Le but de ces tests est d'observer les changements de comportement de la structure mécanique en adéquation avec les éléments optiques lors d'une descente en froid atteignant 30K, afin de reproduire les conditions d'opération du JWST. Ces tests devront être comparés aux tests à température ambiante (§ 6.2). Une mesure de la position absolue de chaque fente avec la détermination de sa largeur et une mesure de PSF sont effectuées à 30K.

6.2.5.1 Mise en place des tests

Afin de répondre aux caractéristiques mécaniques du caisson à vide, les modules d'illumination et de détection ont été modifiés. Seul le prototype ESA se trouve à l'intérieur du caisson à vide. Le module d'illumination est vissé sur la fenêtre d'entrée du caisson tandis que le module de détection est installé sur une table optique à côté du caisson (Figure 3- 37, en haut à droite). Les différentes étapes des tests cryogéniques sont les suivantes :

- Montage et ajustement du banc optique à température ambiante,
- Mesures à température ambiante,
- Mise sous vide du prototype ESA,
- Mesures à température ambiante et sous vide,
- Descente en froid,
- Réajustement, réalignement du banc,
- Mesures à température cryogénique,
- Remontée à température ambiante,
- Réajustement, réalignement du banc et mesures à température ambiante.

Dans un premier temps, à cause du transport, le prototype doit être réintégré de la même manière qu'au paragraphe 6.2.1.

La descente en froid a pour but d'amener la structure mécanique et les optiques à une température de 30K. L'apport en froid entre le prototype et la tête froide est conduit par l'intermédiaire de six tresses thermiques placées sur la structure mécanique et situées près des éléments optiques. La température est contrôlée en plaçant cinq capteurs sur la structure mécanique (Figure 3- 37, en haut à gauche). Pour que la descente en froid soit efficace, un bouclier thermique est fixé sur le diamètre extérieur de la plaque froide. Le prototype, les tresses et le bouclier thermique sont recouverts de Multi Layer Insulation (MLI) (Figure 3- 37, en bas à gauche).

Le support mécanique du prototype est isolé de la plaque froide par trois bipodes en fibres de verre – G10. Ce matériau présente une faible conductivité thermique isolant le prototype de la plaque froide.

Du à la faible conductivité thermique de l'Invar, il existe des gradients de température dans la structure mécanique du prototype ce qui expliquent la non uniformité de température sur le prototype. Après 3 jours, une fois que la température est stabilisée, la température du miroir découpeur atteint 28.3K, celle des barrettes de miroirs pupille et fente atteignent 49.6K (Figure 3- 37, en bas à droite). Certains capteurs de température sont collés sur le prototype. A cause de l'isolation thermique de la colle, la température réelle devrait être inférieure de 2 à 3 K par rapport à la valeur mesurée.

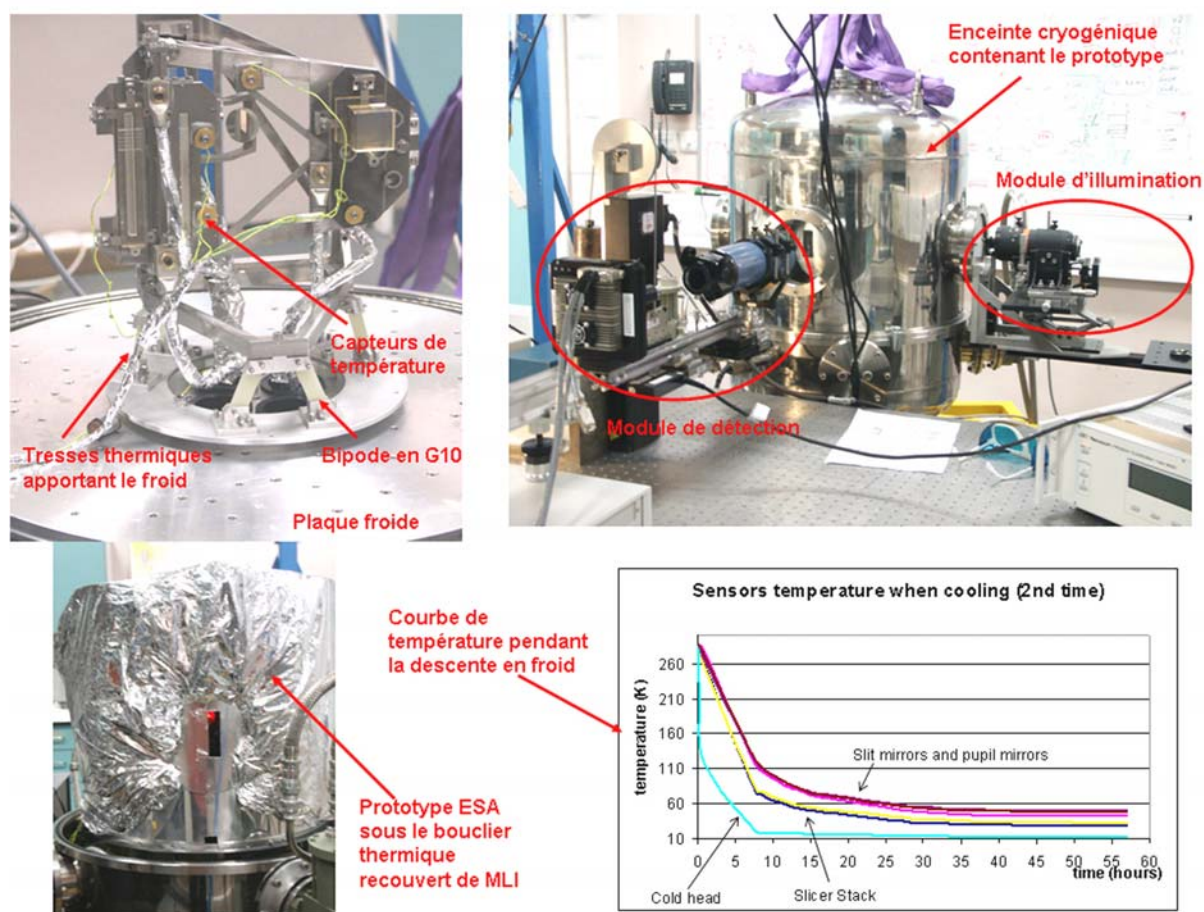


Figure 3- 37 : En haut à gauche : Prototype ESA installé dans l'enceinte cryogénique avec les tresses thermiques, les capteurs de température et les bipodes en G10. En haut à droite : Prototype installé sous le caisson à vide avec le module d'illumination et de détection. En bas à gauche : Prototype sous le bouclier thermique recouvert de MLI. En bas à droite : Courbe de température des éléments optiques lors de la descente en froid.

6.2.5.2 Tests à 30K

Le principal but de ces tests en froid est de mesurer les changements de structures des optiques et de la mécanique entre la température ambiante et l'environnement cryogénique. Pour évaluer les mouvements internes du prototype, la position absolue suivant l'axe y de la fente est mesurée et comparée aux mesures à température ambiante. Suite à un problème de vignettage par le collimateur d'entrée, la longueur de la fente n'a pas pu être mesurée. La référence est le bord du miroir fente. La différence de position suivant l'axe y entre les mesures avant la descente en froid et à 30K est au maximum de 8 μm et elle est au maximum de 15 μm entre 30K et la remontée à chaud.

La mesure de PSF à 577 nm a deux buts :

- Mesurer les déplacements suivant l'axe x et y de la PSF avant la descente à froid, à 30K et au retour à température ambiante,
- Mesurer les effets de la descente en froid sur la forme de la PSF en calculant son énergie encerclée.

La différence de position de la grille de PSF entre les mesures avant la descente en froid et après avoir fait le vide est de 3.8 μm suivant l'axe x et de 5.7 μm suivant l'axe y.

La différence de position suivant l'axe x respectivement l'axe y entre les mesures avant la descente en froid et à 30K est au maximum de 15 μm respectivement 15 μm et elle est au maximum de 17 μm respectivement 10 μm entre 30K et la remontée à chaud. La précision de mesure est de ± 4 μm suivant l'axe x et ± 20 μm suivant l'axe y. De plus, 80% de l'énergie encerclée est contenue dans un cercle de 25 μm de diamètre (Figure 3- 38).

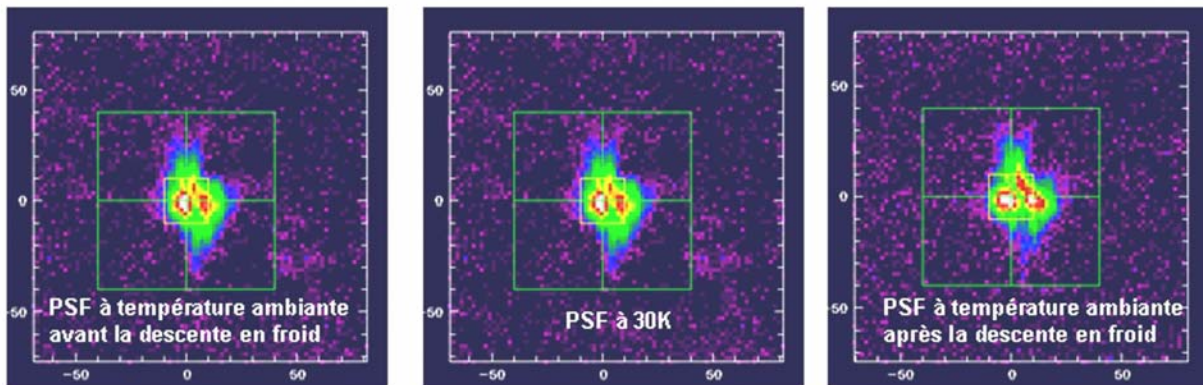


Figure 3- 38 : Mesure de PSF. De gauche à droite : Avant la descente en froid, à 30K, après la remontée à chaud

Lors de la descente en froid, les déplacements provoqués par le comportement de la structure mécanique et le positionnement des optiques sont minimes. En effet, les déplacements observés restent dans les spécifications données lors des tests à chaud. Ceci prouve la validation de ce système découpeur d'images pour une instrumentation spatiale.

6.2.6 Conclusion

Grâce aux résultats des tests, la fabrication et l'assemblage du prototype ESA se révèlent dans les spécifications demandées, ce qui récompense l'effort de R&D démarré avec le prototype CRAL avec de nouveaux processus de fabrication et d'assemblage. De plus, la méthode d'intégration à l'aide d'une machine tridimensionnelle et insertions de cales mécaniques est robuste et a permis d'aligner très rapidement le prototype. Ces tests ont aussi montré la fragilité des barrettes de miroirs pupille et fente qui ont été redessinées afin qu'elles puissent survivre aux tests en vibrations.

7 Conclusion

Ce chapitre propose une comparaison entre deux prototypes en technologie verre applicables au JWST. Le premier, nommé prototype CRAL, est une première mondiale en termes de fabrication, assemblage et tests. Il a permis de révéler certains points clés à améliorer. En effet, le processus de fabrication des slices crée de nombreux éclats sur les bords de celles-ci. De plus, l'assemblage des slices ou des barrettes doit être rendu reproductible et fiable grâce à un support mécanique amélioré. Cependant, les résultats obtenus sur les performances optiques du système sont très encourageants puisque la qualité image est conforme aux spécifications et que nous n'observons pas de chevauchement entre les fentes. Fort de l'expérience acquise sur ce prototype CRAL, un second prototype, nommé ESA, a été lancé en collaboration avec le LAM. Le processus de fabrication est amélioré par adhésion d'une lentille sur la surface active. De plus, le processus d'assemblage de 30 slices s'appuyant sur un trièdre de qualité optique permet un contrôle en temps réel de l'assemblage par visualisation des franges de coin d'air. L'assemblage des barrettes de miroirs pupille ou fente reste délicat en raison des faibles surfaces d'adhérence. Les tests dans le visible et à température ambiante, dont le CRAL était responsable, ont montré une qualité image correcte associée à un excellent alignement des éléments optiques. La tenue de ces derniers sur la structure mécanique a été démontrée lors des tests à température cryogénique et des tests de vibrations effectués au LAM. Finalement, les résultats des tests du prototype ESA récompensent l'effort de R&D entrepris avec Cybernétix puisque :

- Les tolérances de fabrication et d'assemblage entre les deux prototypes étaient deux fois inférieures,
- Le nombre de slices assemblées passe de 11 à 30,
- Le rapport Longueur/Largeur des slices augmente de 50%,
- Le grandissement du slicer passe de 0.148 à 0.09.

Grâce à l'expérience acquise sur ces deux prototypes, l'Observatoire Lyon se positionne comme l'un des leaders mondiaux des systèmes découpeur d'images, grâce à l'étude de designs optiques, aux réalisations de prototypes et aux tests de performances. De plus, il possède une réelle expertise sur les systèmes découpeurs d'images développés en technologie verre. A partir de là, le CRAL est en mesure de répondre à différents appels d'offres de spectrographes intégraux de champ basés sur des systèmes découpeur d'images, tel l'instrument MUSE pour le VLT qui fait l'objet du chapitre suivant.

Références

1. www.jwst.nasa.gov
2. Baggett et al., 2004, "The JWST Science and Operations Center: Current Operational Concepts", AAS, 205, 180.10
3. Horner, S. D., Rieke, M. J., NIRCeam Team, 2003, "Near-Infrared Camera (NIRCeam) for the James Webb Space Telescope (JWST)", AAS, 203, 121.02
4. Lemke et al., 2005, "The James Webb Space Telescope (JWST) and its Mid Infrared Instrument (MIRI)", AN, 326, 579
5. Prieto et al., 2003, "Great opportunity for NGST-NIRSPEC: a high-resolution integral field unit", Proc SPIE 4850, 486

6. Laurent et al., 2004, "Optical Design, Fabrication and Testing a prototype of the NIRSpec IFU", Proc. SPIE, 5252, 443
7. Laurent et al., 2004, "Designing, manufacturing and testing of an advanced image slicer prototype for the James Webb Space Telescope", Proc. SPIE, 5494, 196
8. Fichier Zemax, "ProtoCralReflectiveSlicer.zmx"
9. Lefèvre et al., 2000, "IFMOS: Integral Field Multi Object Spectrograph for the NGST", in "Imaging the Universe in Three Dimensions", Eds. W. van Breugel & J. Bland-Hawthorn, ASP conference, 195, 431
10. Fichier Zemax, "Proto-designV1-def.zmx"
11. Fichier Zemax, "Proto-design V4 _ march-03.zmx"
12. Karow, H. H., 2004, "Fabrication methods for precision optics"
13. Jacobs, S., 1986, "Dimensional stability of materials useful in optical engineering", Optica Acta, 33, 11, 1377-1388
14. Laurent, F., 2002, « Recette des miroirs-slice individuels », SLI-MEM-TEC-005
15. Hénault, F., 2001, « Recette des miroirs pupille individuels », SLI-MEM-TEC-001
16. Prieto, E., 2002, « Statement of work and technical specifications: slice stack for the slicer unit prototyping »,
17. Macaire, C., 2003, « Image slicer prototype design document », n°LAM/OPT/SLI/TRE/0046
18. Bonneville and al., 2004, "Image slicer manufacturing: from space application to mass production", Proc. SPIE., 5494, 188
19. Laurent, F., 2002, « Assemblage du bloc slicer », SLI-MEM-TEC-006
20. Laurent, F., 2002, « Recette de contrôle des faces arrière et latérales du bloc slicer », SLI-MEM-TEC-007
21. Hénault, F., 2001, « Assemblage de la barrette des miroirs pupille », SLI-MEM-TEC-002
22. Hénault, F., 2001, « Test de la barrette des miroirs pupille collés », SLI-MEM-TEC-003
23. Macaire, C., 2004, « Tests report », n°LAM.OPT.SLI.RAP.040116_01
24. Laurent, P., 2004, « Compte rendu d'essais – Vibrations », n°LAM.ESS.SLI.PRIV.031009
25. Hénault, F., 2001, "IFU Mini-breadboard Test Plan", n°SLI-MEM-TEC-004
26. Laurent, F., Macaire, C., 2003, « Image slicer prototype test plan », n°LAM/OPT/SLI/RPT/0038
27. Laurent, F., 2002, « Procédures d'alignements du banc proto CRAL », Procedure_alignement_pmf.doc et Procedure_alignement_pmp.doc
28. Laurent, F., 2003, "Compte Rendu de tests dans le plan des miroirs pupille", n° OPT-MEM-TEC-001/2003
29. Laurent, F., 2003, "Compte Rendu des tests dans le plan des miroirs fente", n° OPT-MEM-TEC-010/2003
30. Laurent, F., 2003, "Compte Rendu des tests dans le plan des miroirs fente pour la mesure de PSF", n° OPT-MEM-TEC-017/2003
31. Macaire, C., 2003, "JWST IFU Prototype - Tolerancing Study", n° LAM/OPT/SLI/RPT/0031

CHAPITRE 4

**TESTS DE PERFORMANCES D'UN
DECOUPEUR D'IMAGES EN
TECHNOLOGIE « VERRE ».
APPLICATION À L'INSTRUMENT MUSE
POUR LE VLT**

CHAPITRE 4

TESTS DE PERFORMANCES D'UN DECOUPEUR D'IMAGES EN TECHNOLOGIE « VERRE ».

APPLICATION À L'INSTRUMENT MUSE POUR LE VLT

1 Introduction

En 1993, l'ESO lance le projet VLT (Very Large Telescope) et décide de l'installer sur le site de Cerro Paranal, situé dans le désert d'Atacama au nord du Chili, à une altitude de 2635 mètres, où l'environnement est particulièrement favorable aux observations astronomiques [1]. Ce site est quasi idéal, seuls quelques tremblements de terre peuvent occasionnellement perturber les observations. Le VLT est constitué d'un ensemble de 4 télescopes principaux (Unit Telescope – UT) mises en service entre 1998 et 2002 allant de l'ultraviolet à l'infrarouge (Antu, Kueyen, Melipal et Yepun.) disposés dans une configuration en forme de trapèze (Figure 4-1).



Figure 4- 1 : Les quatre télescopes du VLT, au Chili

Le diamètre de chacun des miroirs primaires est de 8.2 mètres pour une épaisseur très fine de 17.6 centimètres. Cette finesse offre des avantages au niveau du coût de fabrication mais occasionne des difficultés lors de leur mise en place. Même s'ils sont fins, ils pèsent tout de même 23 tonnes chacun et leur poids a tendance à les déformer. Pour y remédier, l'ESO a mis au point un système d'optique active, où des vérins annulent les déformations des miroirs, pour leur garder une forme optimale, et cela quelle que soit leur orientation. L'ESO a également développé un système d'optique adaptative pour annuler les perturbations du front d'onde engendrées par les couches turbulentes de l'atmosphère. De plus, quatre télescopes auxiliaires (Auxiliary Telescope – AT) de 1.80 m, dont l'installation sera terminée fin 2006, sont situés sur le Mont Paranal. Ces télescopes sont capables de se déplacer le long de voies ferrées de façon à former, lorsque les huit télescopes du VLT seront en activité, un interféromètre dont la résolution angulaire serait équivalente à un télescope optique de 200 m. Les quatre télescopes principaux disposent de plusieurs foyers permettant d'y installer divers instruments dits de première génération – CRIRES, FORS1/2, ISAAC, FLAMES, UVES, VISIR, VIMOS, SINFONI, CONICA et NAOS. Le fonctionnement principal du VLT consiste à utiliser les quatre télescopes indépendamment. Le mode interférométrique est plus rarement utilisé, principalement en raison du fait qu'il nécessite l'utilisation simultanée de deux ou trois télescopes pour un seul programme d'observations. Les télescopes auxiliaires sont réservés à l'interférométrie. Le VLTI (I comme « interféromètre ») est un système extrêmement complexe qui rassemble de manière cohérente plusieurs faisceaux provenant des UT ou bien des AT dans une pièce appelée le laboratoire focal. Différents programmes tels

que AMBER, MIDI et VINCI permettent de recombinaison plusieurs télescopes dans l'infrarouge proche et lointain.

Pour maintenir la compétitivité du VLT et assurer sa pérennité, l'ESO a lancé en 2001 un appel d'offre d'instruments de seconde génération pour le VLT visant à remplacer ceux de première génération. Quatre instruments de seconde génération ont été sélectionnés par l'ESO :

- X-Shooter , spectrographe à fente longue couvrant une très large bande spectrale (0.3 – 1.9 μm),
- KMOS, spectrographe multi objets, cryogénique, de 1 à 2.5 μm ,
- « Planet Finder », coronographe dédié à la recherche des exoplanètes,
- MUSE (Multi Unit Spectrograph Explorer), spectrographe intégral de champ dans le visible (0.465 – 0.93 μm).

MUSE est un spectrographe intégral de champ innovant qui sera installé en 2012 sur une plate forme Nasmyth d'un des 4 télescopes UT. MUSE comporte un mode champ large (Wide Field Mode – WFM) de 1×1 minute d'arc échantillonné à 0.2×0.2 seconde d'arc par pixel, et un mode champ étroit (Narrow Field Mode – NFM) de 7.5×7.5 secondes d'arc échantillonné à 0.025 seconde d'arc par pixel. Ces deux modes seront assistés par un système d'optique adaptative appelé GALACSI – Ground Atmospheric Layer Adaptive Corrector for Spectroscopic Imaging. Le miroir secondaire du télescope où sera installé MUSE, sera remplacé par un miroir secondaire adaptatif associé à un système de quatre étoiles laser qui assurera les performances de GALACSI. MUSE opérera dans le visible et le proche infrarouge (0.465 – 0.93 μm) avec une résolution spectrale de 3000.

Le principal défi scientifique de MUSE est l'étude de la formation et l'évolution des galaxies et notamment les plus lointaines ayant un décalage vers le rouge supérieur à six. MUSE devient alors un réel sondeur de l'Univers à la recherche de nos origines.

Pour répondre à cet enjeu scientifique, un Consortium piloté par le CRAL est constitué de sept instituts de recherche européens dont les responsabilités sont réparties ainsi :

- CRAL – Management, ingénierie système, architecture optique, design de l'IFU comprenant le découpeur d'images, le spectrographe et le détecteur, responsabilité des AIT (Assembly, Integration and Tests),
- Institut Astrophysique de Goettingen – Structure mécanique et optiques de relais,
- AIP Postdam – Unité de calibration et logiciels de réduction de données,
- Leiden – Optique adaptative (analyse et interface avec l'ESO),
- ETH Zurich – Spectrographes,
- LAOMP Toulouse – Optique d'entrée, électronique et contrôle commande,
- ESO – Détecteurs.

L'instrument MUSE représenté schématiquement sur la Figure 4- 2 est équipé de [2] :

- Une unité de calibration reproduisant le nombre d'ouverture du VLT,
- Une optique d'entrée incluant un dérotateur, un compensateur de dispersion atmosphérique en NFM et un diviseur de champ. Le plan focal du télescope est imagé sur ce dernier qui découpe le champ principal en 24 sous champs,
- Une optique de relais image les 24 sous champs à l'entrée de 24 IFUs identiques formés d'un système découpeur d'images associé à un spectrographe.

Le spectrographe est composé d'un collimateur, d'un VPHG (Volume Phase Holographic Grating), d'une caméra et d'un détecteur CCD de 4096×4096 pixels de 15 μm chacun.

Le cœur de l'instrument MUSE est incontestablement le système découpeur d'images. En effet, après une Pré-phase A¹ positive, l'ESO recommande au Consortium de fabriquer et de tester un prototype découpeur d'images représentatif de MUSE pour la fin de la Phase A programmée en mars 2004.

Ce chapitre présente le design optique du système découpeur d'images défini durant la phase A de MUSE, les caractéristiques du prototype, sa fabrication ainsi que les tests d'alignement et de qualité image. Enfin, une conclusion permettra de comparer ce prototype MUSE aux deux prototypes précédents réalisés pour l'instrumentation du JWST.

Ce chapitre est illustré par une communication présentée à la conférence SPIE « Optical Systems Design 2005 » de Jena (Allemagne) qui s'est déroulé du 13 au 16 septembre 2005, et intitulée : « Optical design, manufacturing and tests of the MUSE Image Slicer » [3] (voir Annexe 3). Un article a été récemment soumis au journal « Publications of the Astronomical Society of the Pacific » (PASP), qui s'intitule « An Image Slicer Integral Field Unit for 3D spectroscopy » et qui est en cours de révision.

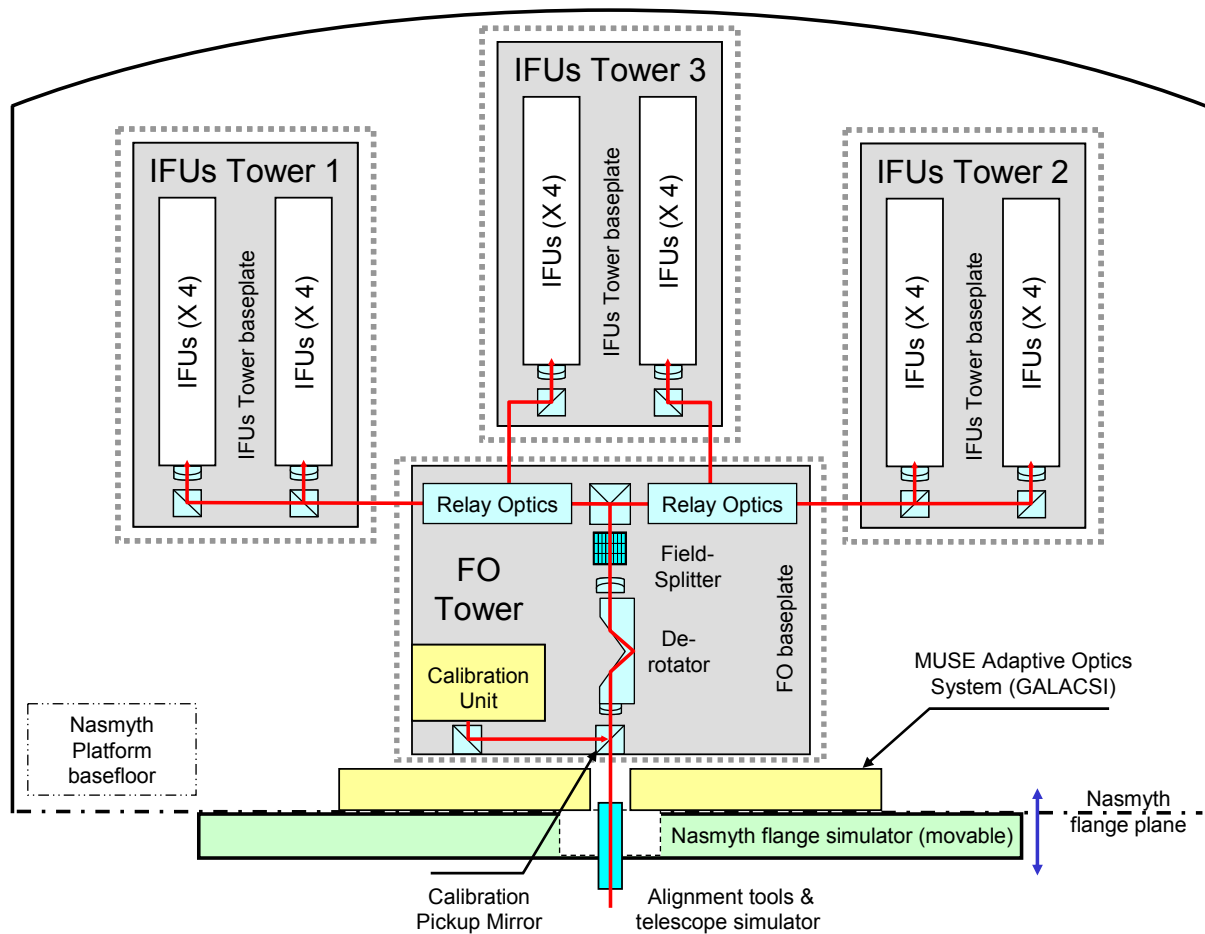


Figure 4- 2 : Bloc diagramme de l'instrument MUSE

¹ Pré-phase A : Définition des besoins scientifiques par le Consortium, recherche de concepts opto-mécaniques adéquats.

2 Design Optique

2.1 Présentation du système découpeur d'images de Phase A

Le diviseur de champ placé à la sortie de l'optique d'entrée le découpe en 24 sous champs rectangulaires. Chaque sous champ est imagé par des relais optiques sur un miroir découpeur. Dans le cas de MUSE, le système « classique » de découpeur d'images à trois éléments réflectifs présenté au Chapitre 2 n'est pas directement applicable pour plusieurs raisons [4] :

- Le sous champ de vue de 20×7.5 secondes d'arc qui augmente l'incidence des rayons arrivant sur le miroir découpeur, créant de l'aberration pupillaire dans le plan des pupilles intermédiaires et aussi dans le plan de la pupille de sortie,
- Un rapport de grandissement particulièrement faible (0.043) engendrant une qualité image médiocre,
- Un nombre élevé d'éléments individuels différents (114 par voie), conduisant à des risques de fabrication et d'assemblage et à un coût élevé.

La plupart de ces problèmes ont pu être surmontés en remplaçant les barrettes de miroirs pupille et fente par des barrettes de mini lentilles identiques en association avec deux lentilles de champ comme le montre la Figure 4- 3. Ce découpeur d'images est appelé « découpeur d'images catadioptrique » (Catadioptric Image Slicer – CIS).

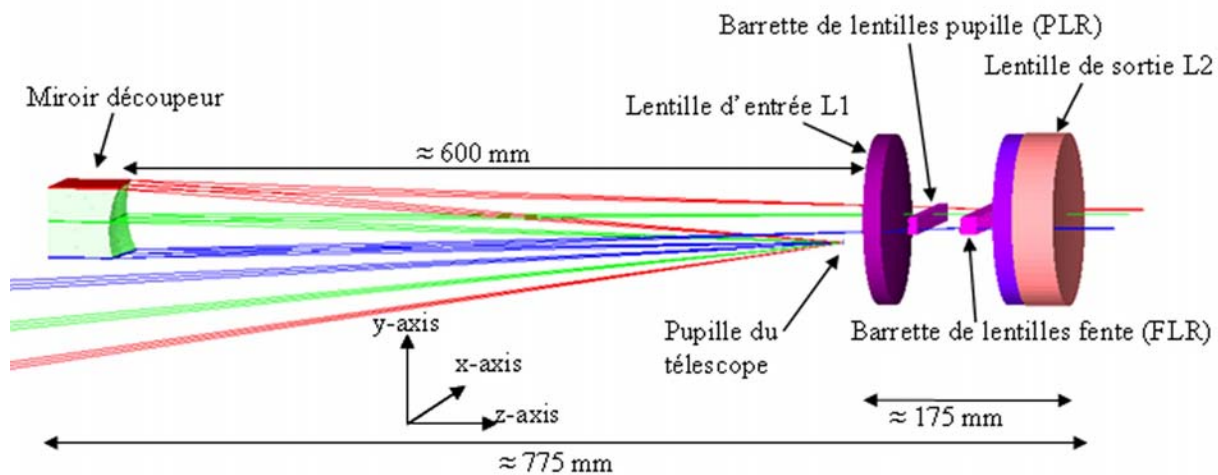


Figure 4- 3 : Design optique du système découpeur d'images de l'instrument MUSE

La pupille d'entrée du découpeur d'images est située sur un miroir sphérique placé à 575 mm du miroir découpeur, où elle est matérialisée par un masque elliptique (5.77 mm suivant l'axe x et 2.54 mm suivant l'axe y). L'angle d'incidence sur le miroir découpeur est de 1° . De ce fait, le chemin optique est presque identique pour toutes les slices, ce qui réduit les aberrations et permet d'optimiser la qualité image.

Le système découpeur de l'instrument MUSE présenté en Phase A est lui-même constitué de :

- Un miroir découpeur. Le plan focal du télescope est imagé sur ce dernier à l'aide d'une optique d'entrée placée au niveau de la pupille du télescope. Le miroir découpeur forme l'image de la pupille du télescope à $750 \mu\text{m}$ en amont de la barrette de lentilles pupille où un masque pupille est placé. Les angles des slices réarrangent les pupilles intermédiaires sur deux lignes disposées en quinconce. Chaque slice présente des angles différents suivant les deux axes x et y. Les tolérances de fabrication sur le centre de courbure des slices sont de $\pm 50 \mu\text{m}$ suivant l'axe x (soit un angle de 9 secondes d'arc) et $\pm 100 \mu\text{m}$ suivant l'axe y (soit un angle de 18 secondes d'arc).

Etant donné que toutes les slices ont le même rayon de courbure ($R = 604.63 \pm 0.75$ mm), elles sont décalées suivant l'axe z afin de réarranger les pupilles intermédiaires sur un même plan. Le miroir découpeur est composé de 38 slices. Chaque slice mesure 81 mm de long et 1.59 mm de large (Figure 4- 4). Le rapport longueur/largeur est de 50. La distance moyenne entre le miroir découpeur et la lentille d'entrée L1 est de 600 mm.

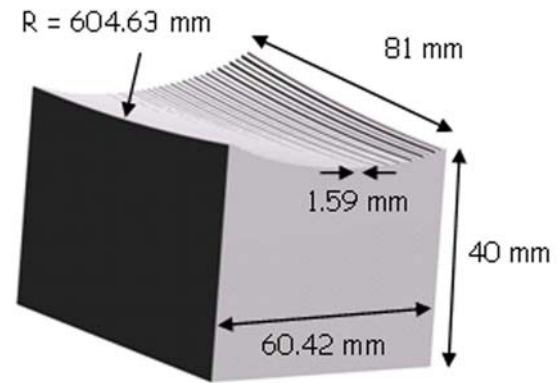


Figure 4- 4 : Caractéristiques du découpeur d'images MUSE

- La lentille d'entrée L1. Afin de rendre parallèles les faisceaux incidents arrivant sur les lentilles fente, il a été imaginé d'insérer des mini prismes d'épaisseurs différentes derrière les lentilles pupille (Figure 4- 5). A l'aide du logiciel de tracé de rayons Zemax, ces mini prismes peuvent être approximés par un doublet placé à 14.7 mm devant les lentilles pupille. Le foyer de ce doublet, noté L1, coïncide avec le miroir découpeur.

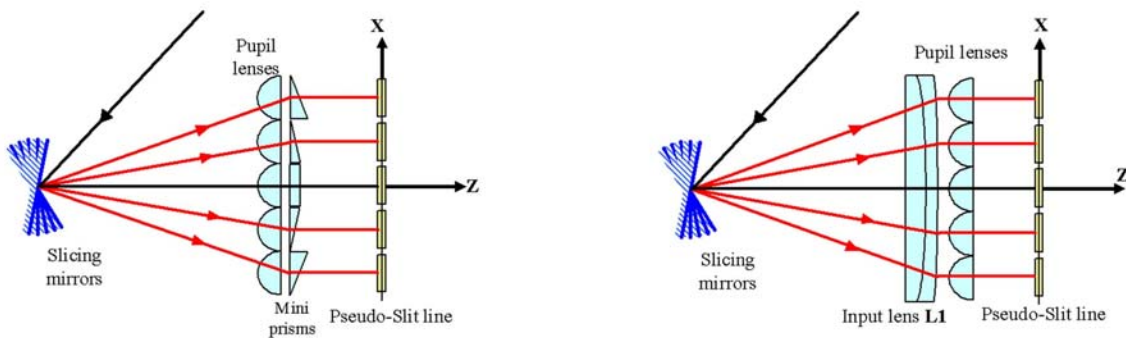


Figure 4- 5 : Illustration de l'implantation de la lentille d'entrée L1

- Une barrette de lentilles pupille (PLR). Le couple PLR – L1 forme une image des slices de qualité médiocre à $750 \mu\text{m}$ de la barrette de lentilles fente où un masque est placé. La PLR est composée de 38 mini lentilles identiques arrangées en deux lignes disposées en quinconce. Chaque lentille plan-convexe est carrée (7.326×7.326 mm) et a une épaisseur de 5.6 mm (Figure 4- 6).
- Une barrette de lentilles fente (FLR). Cette barrette réimage chaque pupille intermédiaire à l'infini de manière à recombinaison une pupille unique. Elle ressemble très fortement à la PLR de part leurs dimensions géométriques identiques. Chaque lentille est un ménisque d'épaisseur 17.9 mm. La distance entre PLR et FLR est de 40.59 mm (Figure 4- 6).
- Une lentille de sortie L2. Cette lentille joue un rôle similaire à L1. De plus, ce doublet compense le chromatisme axial du système découpeur d'images et crée une image virtuelle de la pseudo fente localisée entre la FLR et la L2.

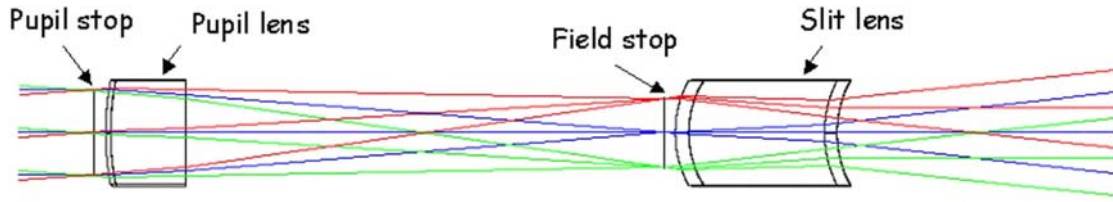


Figure 4- 6 : Formes géométriques d'une lentille pupille et fente

Un des problèmes de ce découpeur d'images est que les faisceaux optiques provenant d'une slice supérieure n'arrivent pas avec la même incidence sur les lentilles pupilles que les rayons venant d'une slice située au centre. Les pupilles intermédiaires et les mini fentes sont alors disposées en escalier dans leurs plans respectifs. Un calcul simple du premier ordre montre qu'une rotation d'un angle ψ autour de l'axe optique des rangées de mini lentilles permet de résoudre ce problème. L'angle de compensation est donné par la formule $\psi \approx -\gamma_s \frac{2d_s}{d_p}$ où d_s

est la hauteur d'une slice, d_p la largeur d'une mini lentille et γ_s le grandissement du découpeur d'images. Dans le cas de MUSE, chaque barrette de mini lentilles doit être tournée de 1.07° autour de l'axe z . La fente est alors parallèle à l'axe x mais on constate que l'écart entre chaque mini fente n'est plus constant (Figure 4- 7).

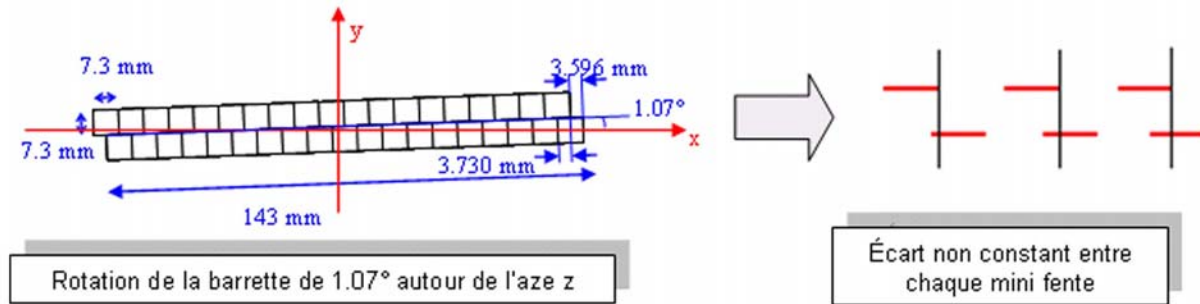


Figure 4- 7 : Illustration de l'effet de la rotation autour de l'axe z sur l'écart entre les mini fentes

Le centre de chaque mini-lentille a subi une rotation. Le décalage suivant l'axe x du centre des lentilles dépend de sa distance par rapport au centre de rotation. Ce décalage peut être calculé analytiquement. On note X_0 la position du centre des lentilles suivant l'axe x avant la rotation, la position du centre suivant l'axe y est soit Y_0 pour la rangée du haut, soit $-Y_0$ pour la rangée du bas et le centre de rotation est au centre du repère.

Après la rotation, on obtient :

Pour la rangée du haut :

$$X = X_0 \cos \theta - Y_0 \sin \theta$$

$$Y = X_0 \sin \theta + Y_0 \cos \theta$$

Pour la rangée du bas :

$$X = X_0 \cos \theta + Y_0 \sin \theta$$

$$Y = X_0 \sin \theta - Y_0 \cos \theta$$

En considérant θ petit, les formules précédentes se simplifient comme suit :

Pour la rangée du haut :

$$X = X_0 - Y_0 \theta$$

$$Y = X_0 \theta + Y_0$$

Pour la rangée du bas :

$$X = X_0 + Y_0 \theta$$

$$Y = X_0 \theta - Y_0$$

Le terme $X_0 \theta$ permet de compenser l'effet d'escalier. Pour retrouver un écart constant entre les mini fentes, il faut donc translater la rangée du haut d'une quantité $Y_0 \theta$ soit $67 \mu\text{m}$ suivant l'axe x et la rangée du bas d'une quantité $-Y_0 \theta$ correspondant à $-67 \mu\text{m}$ suivant l'axe x .

Les spécifications de haut niveau du découpeur d'images MUSE sont rassemblées dans le Tableau 4- 1.

| | IFU MUSE |
|---|-----------------------------------|
| Dimension de la pupille d'entrée (mm) suivant l'axe x | 5.77 |
| Dimension de la pupille d'entrée (mm) suivant l'axe y | 2.54 |
| Nombre F/D en entrée suivant l'axe x | 103.8 |
| Nombre F/D en entrée suivant l'axe y | 207.6 |
| Nombre F/D en sortie suivant l'axe x | 4.5 |
| Nombre F/D en sortie suivant l'axe y | 9 |
| Position (mm) suivant l'axe z de la pupille d'entrée | 575 |
| Grandissement du système découpeur d'images | 0.043 |
| Energie encerclée dans le plan de la pseudo fente | 85 % dans un rectangle de 35x70µm |

Tableau 4- 1 : Spécifications d'entrée/sortie du système découpeur d'images de MUSE

2.2 Caractéristiques du prototype

Un prototype représentatif du système découpeur d'images MUSE décrit au paragraphe 2.1 a été assemblé et testé à l'Observatoire de Lyon. Ce prototype est composé de :

- Un miroir découpeur à 38 slices dont 12 sont représentatives de MUSE et 26 ont une surface active plane. Les slices actives sont réparties par lot de quatre : 4 situées en bas du miroir découpeur (n°1 à 4), 4 au milieu (n°19 à 22) et 4 en haut (n°35 à 38). Chaque lot de slices actives est séparé par des slices planes,
- Une lentille d'entrée L1,
- Une barrette de quatre lentilles pupille qui peut être translatée suivant l'axe x afin de coïncider avec les trois groupes de slices actives,
- Un masque pupille, placé dans le plan des pupilles intermédiaires,
- Une barrette de quatre lentilles fente qui est translatée suivant l'axe x afin de coïncider avec les lentilles pupille et les trois groupes de slices actives,
- Un masque fente, placé à 750 µm des lentilles fente,
- Une lentille de sortie L2.

Les caractéristiques optiques de chaque composant sont données dans le paragraphe 2.1. Le miroir découpeur est monté sur un support mécanique avec 6 degrés de liberté. L'ensemble – L1, PLR, FLR, L2 – est monté dans une même structure mécanique permettant la translation et rotation suivant l'axe z et la translation suivant l'axe x des barrettes de lentilles. L'activité sur les découpeurs d'images a duré 18 mois comme l'indique le planning de la Figure 4- 8.

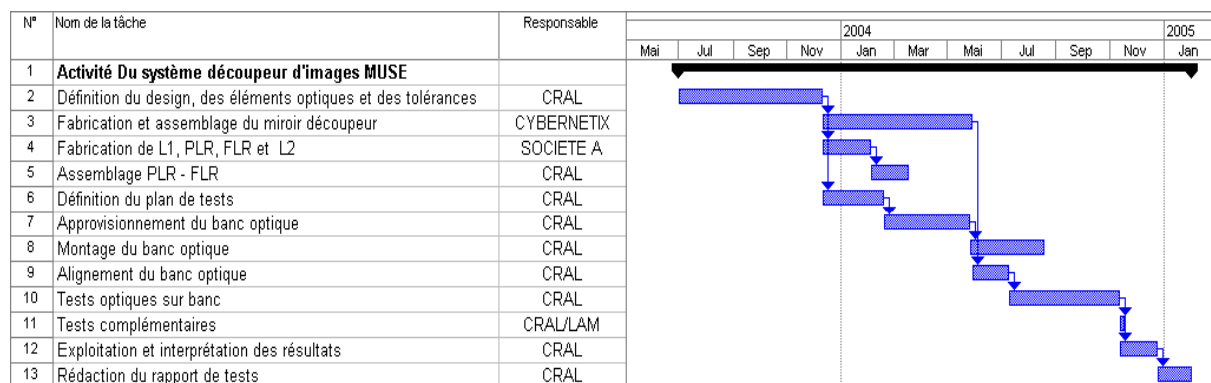


Figure 4- 8 : Planning du prototype MUSE

3 Fabrication et assemblage

3.1 Miroir découpeur du prototype MUSE

Tout comme les prototypes « CRAL » et « ESA », les slices du miroir découpeur du prototype MUSE sont en Zérodur et polies avec des techniques classiques par Cybernétix (voir Chapitre 3).

Le processus de fabrication des slices MUSE, présenté sur la Figure 4- 9 est très proche de celles du prototype ESA (Chapitre 3, § 3.3). En effet, dans un premier temps, on polit la surface sphérique d'un bloc de Zérodur connu géométriquement. Ensuite, une lentille est adhéree sur la surface sphérique pour obtenir après la découpe des bords vifs sans éclats. Le bloc est découpé afin d'en extraire deux slices, en prenant garde à polir les surfaces d'adhérence parallèles entre elles et perpendiculaires aux surfaces de référence et à conserver le positionnement du centre de courbure. L'extraction de ces deux slices est rendue possible, car les slices du prototype MUSE sont antisymétriques (par exemple, la slice n°1 est identique en fabrication à la slice n°38). Les tolérances de positionnement du centre de courbure sont trois fois inférieures à celles du prototype ESA : $R = 604.63 \pm 0.75 \text{ mm}$, $\Delta X_c = \pm 50 \text{ } \mu\text{m}$ (soit $9''$), $\Delta Y_c = \pm 100 \text{ } \mu\text{m}$ (soit $18''$) et $\Delta Z_c = \pm 200 \text{ } \mu\text{m}$ [5]. La qualité image de la surface active doit être inférieure à $\lambda/2$ PTV et celle des surfaces d'adhérence à $\lambda/4$ PTV. La hauteur des slices est de $1.59 \pm 0.01 \text{ mm}$. Chaque slice est décalée suivant l'axe z afin que toutes les pupilles intermédiaires soient dans le même plan. Pour réaliser ceci, une fois la slice terminée, elle est adhéree moléculairement entre trois blocs de Zérodur par visualisation des franges de coin d'air. Le bloc inférieur est désadhéré afin de polir à la profondeur demandée la slice prise en sandwich avec les deux autres blocs. Lors de cette opération, on prend garde à conserver la perpendicularité des deux faces de référence pour l'assemblage (Figure 4- 9 – à droite).

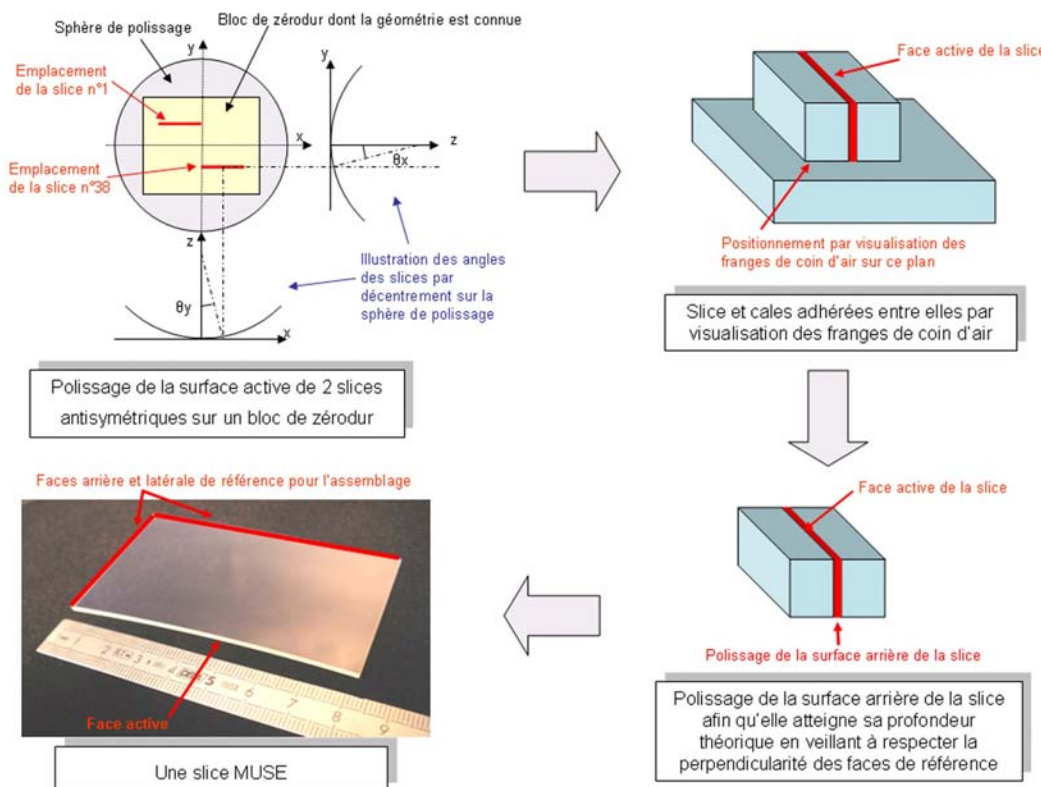


Figure 4- 9 : Processus de fabrication des slices MUSE. En haut à gauche : Polissage d'un bloc de Zérodur. A droite : Désépaississement d'une slice. En bas à gauche : Une slice MUSE.

Une fois les slices fabriquées, elles sont assemblées par adhésion moléculaire à l'aide d'un trièdre de qualité optique possédant une tige sur le coté de la slice et trois contre sa face arrière. Le processus d'assemblage et de contrôle est identique à celui du prototype ESA (Chapitre 3, § 4.3) et est présenté sur la Figure 4- 10.

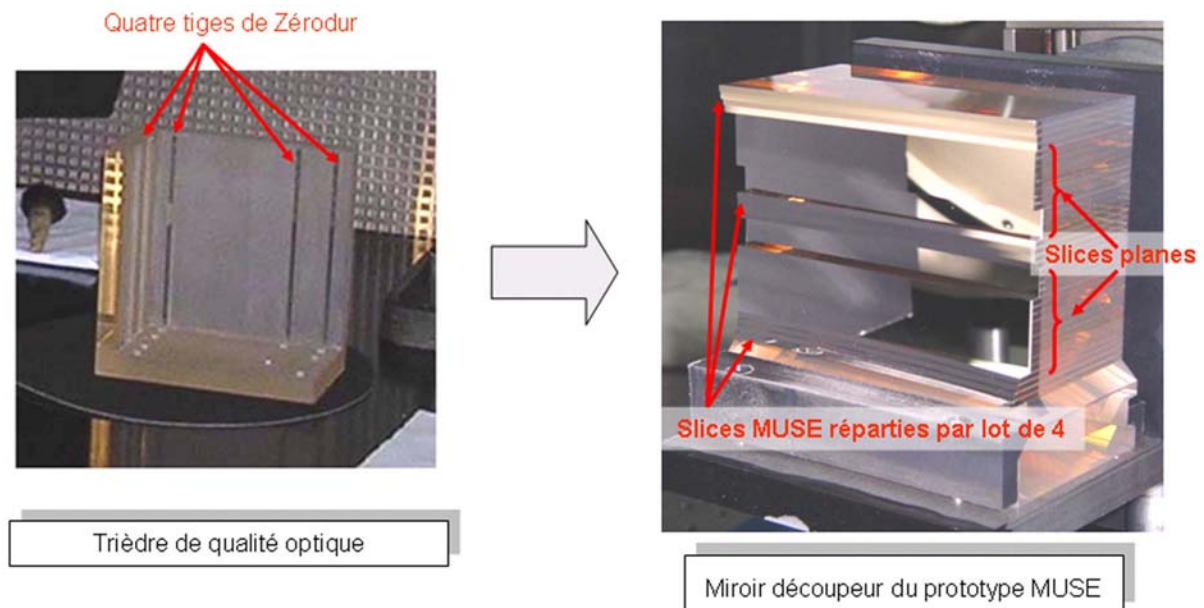


Figure 4- 10 : Processus d'assemblage du prototype MUSE. A gauche : Trièdre optique. A droite : Miroir découpeur MUSE

3.2 Ensemble L1 – PLR – FLR – L2 du prototype MUSE

Chaque lentille de l'ensemble L1 – PLR – FLR – L2 a été fabriquée par une société nommée A dans le matériau prévu par le design optique. La fabrication fait appel à des méthodes classiques de polissage. L'observatoire de Lyon est chargé de réaliser les montures mécaniques de chaque lentille. De plus, l'assemblage des quatre lentilles pupille et fente est réalisé dans nos ateliers grâce à des supports mécaniques appropriés et des cales de serrage (Figure 4- 11). Chaque lentille est contrôlée visuellement avant d'être installée sur le banc optique. La Figure 4- 12 présente les lentilles de champ L1 et L2 ainsi que leurs structures mécaniques.

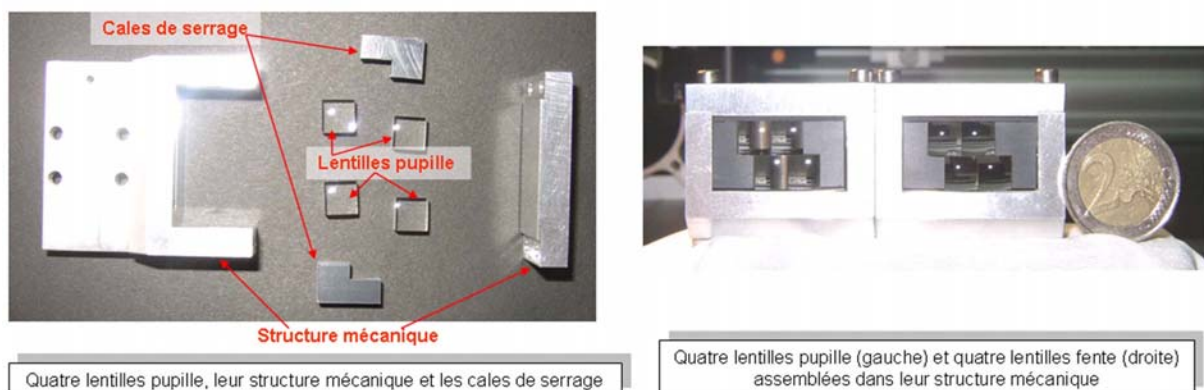


Figure 4- 11 : Procédé d'assemblage des PLR et FLR

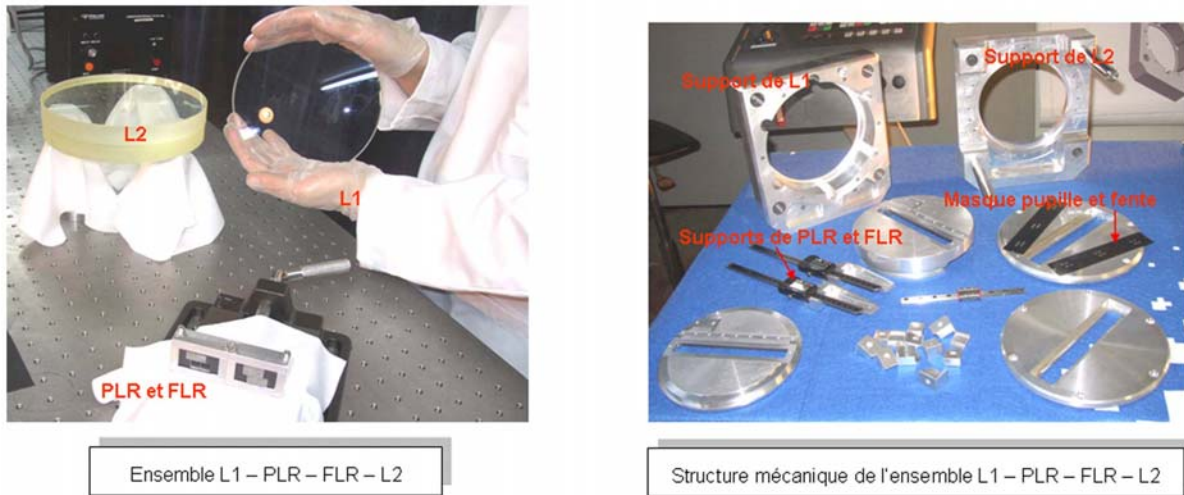


Figure 4- 12 : L1 et L2 et leurs structures mécanique

4 Liste des tests

Après un contrôle visuel des composants individuels constituant le prototype MUSE, ainsi que des mesures de rugosité et de Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) réalisées au Laboratoire des Matériaux Avancés¹ (LMA), ceux-ci sont installés dans leurs supports mécaniques, équipés de différentes platines de translation et de rotation définies dans le plan de test du prototype [6]. Ici encore, ce dernier suit la méthodologie de tests définie au Chapitre 2 et s'articule autour de 5 mesures principales :

- Le test n°1 est dédié à la mesure des positions relatives et absolues des images de la pupille du télescope dans le plan des pupilles intermédiaires, permettant de connaître les angles des slices,
- Le test n°2 étudie les positions relatives des mini fentes et détermine l'espace libre entre chacune d'entre elles dans le plan de la pseudo fente,
- Le test n°3 mesure la longueur et la largeur de chaque fente, permettant ainsi de valider le grandissement du système découpeur d'images,
- Le test n°4 estime la qualité d'image du système par la mesure de PSF dans le plan de la pseudo fente,
- Le test n°5 permet de connaître la dimension de la pupille de sortie afin de remonter au nombre d'ouverture de sortie du système découpeur d'images.

Toutes les spécifications de haut niveau correspondant aux tests précédemment cités sont explicitées dans le Tableau 4- 2. Par la suite, un test complémentaire au test n°1 évaluant l'orientation des faces arrière et latérale du miroir découpeur a été effectué au LAM.

Tout comme les prototypes CRAL et ESA, le banc de tests est équipé d'un module d'illumination et de détection remplissant les mêmes fonctions que celles citées au Chapitre 3 (§5), et représentés sur la Figure 4- 13. Le module de détection est placé sur trois platines de translations motorisées afin que ses déplacements soient connus à quelques microns près.

¹ Le Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) est une unité propre de service du CNRS. Il est spécialisé dans l'étude, la réalisation et la caractérisation de couches minces réalisées par différents procédés sous vide (CVD, PVD). Ces dépôts sont utilisés pour des applications optiques (miroirs faibles pertes pour gyrolaser ou interféromètres, antireflets, dichroïques ...) et mécaniques (tenue à la pluvio-érosion, à la corrosion marine). Le laboratoire est en particulier impliqué dans le programme Franco-Italien de détection des ondes gravitationnelles VIRGO (miroirs VIRGO réalisés par le LMA) et le programme américain LIGO.

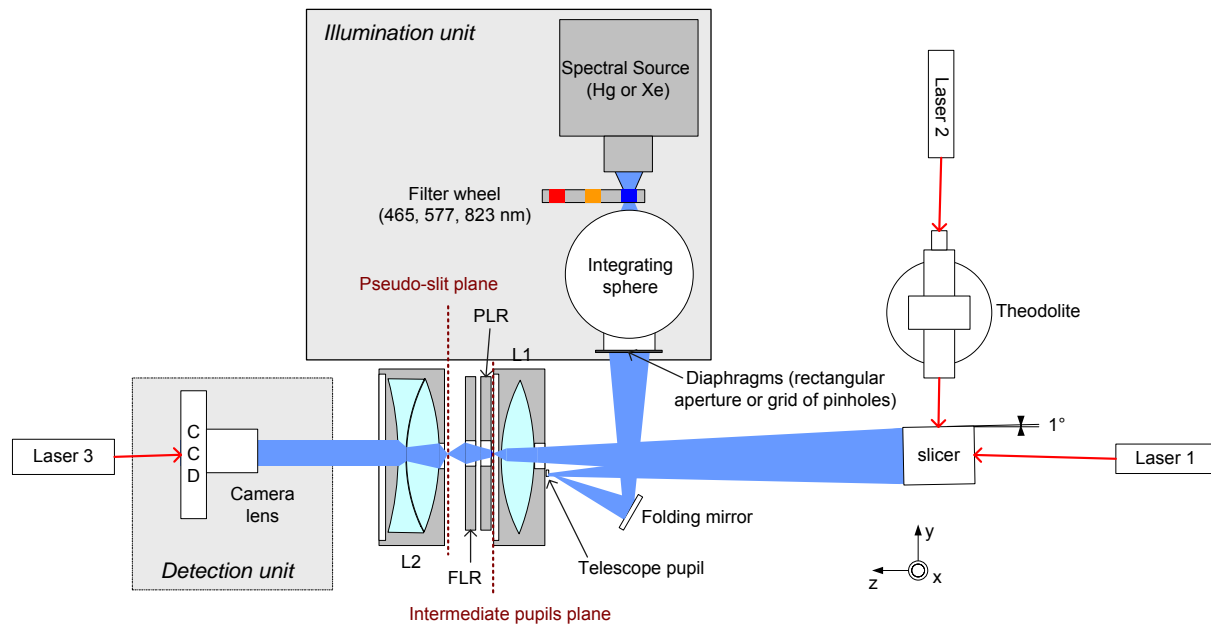


Figure 4- 13 : Plan schématique du banc de tests du prototype MUSE

Afin d'aligner correctement le banc de test dédié au prototype MUSE, une procédure d'alignement a été élaborée [7] et présentée en Annexe 2.

En effet, la référence optique est donnée par l'axe optique de la lentille L1 qui est matérialisée par autocollimation de deux lasers Hélium Néon (n°1 et n°3 sur la Figure 4- 13). Les lasers 1 – 3 sont placés aux extrémités de la table optique afin que la précision angulaire atteigne 10 secondes d'arc. Les trois axes de translation du module de détection sont alignés sur les axes de référence dont les coordonnées sont repérées sur le rack de commandes des platines. Un autre laser (noté laser 2) perpendiculaire à l'axe de référence est placé à 3 mètres. La perpendicularité entre le laser 1 et 2 s'obtient en plaçant un prisme de référence au niveau du miroir découpeur, donnant ainsi une précision angulaire de 15 secondes d'arc. On remplace alors le prisme par le miroir découpeur. Les faces supérieure (face d'adhérence polie à $\lambda/4$) et latérale (référence lors de l'empilement) sont utilisées pour ajuster l'angle autour de l'axe x et z du miroir découpeur grâce au laser 2. L'inclinaison autour de y est réglé par autocollimation des slices inactives sur le laser 3 qui permettra d'aligner le module d'illumination. L'angle de 1° du miroir découpeur est réalisé en intercalant un théodolite entre le laser 2 et le slicer (précision de l'ordre de $3''$).

L'ajustement en translation du miroir découpeur se fait à l'aide du laser 3 qui se réfléchit entre les slices n°19 et 20 donnant un double spot de retour autour de la pupille elliptique. La hauteur et le positionnement suivant l'axe optique du miroir découpeur sont affinés en faisant la mise au point des pupilles intermédiaires sur les masques pupilles. Un tilt de la pupille d'entrée autour de l'axe z induit un effet de « marches d'escalier » que l'on corrige en tournant le masque elliptique et en imageant les pupilles au travers du miroir découpeur et de L1 (sans les PLR, FLR ni L2). Le test n°1 est alors réalisé.

Pour les tests suivants, les autres éléments – PLR, FLR, L2 – sont alignés sur le banc avec les outils précédents. Le barillet de L2 est placé à la bonne distance mécanique par introduction d'une cale et est réglé par autocollimation sur le laser 3. La distance des PLR et FLR à l'axe optique est réglée théoriquement à l'aide des afficheurs numériques de pieds à coulisse montés sur les platines de translation (précision 1/10 de mm). Les PLR et FLR sont placées sur deux disques tournant autour de l'axe z. L'angle est préréglé mécaniquement et ajusté lors de l'observation de mini fentes en marches d'escaliers. Un réglage ultime des tilts θ_z des FLR est réalisé en observant la pupille de sortie.

| SPECIFICATIONS | | Plan de mesures | | |
|--|---|---|--|---|
| | | Plan des pupilles intermédiaires | Plan de la pseudo fente | Plan de la pupille de sortie |
| Positionnement des pupilles intermédiaires | Positions des pupilles intermédiaires | Au centre de leur lentille pupille. Précision de $\pm 50 \mu\text{m}$ suivant l'axe x $\pm 100 \mu\text{m}$ suivant l'axe y | | |
| | Angles θ_x et θ_y des slices | Valeurs individuelles: $\pm 9''$ autour de l'axe y $\pm 18''$ autour de l'axe x | | |
| | Marge optique: Pourcentage d'espace libre entre la dimension de la pupille intermédiaire et sa lentille pupille | $> 10\%$ suivant l'axe x | | |
| Grandissement du système | | | 0.043 ± 0.001 | |
| Dimensions des mini fentes | | | Longueur suivant l'axe x = $3.49 \pm 0.08 \text{ mm}$ Largeur suivant l'axe y = $69 \pm 2 \mu\text{m}$ | |
| Qualité Image (PSF) | | | 85 % d'énergie contenue dans un rectangle de $35 \times 70 \mu\text{m}$ | |
| Positionnement des mini fentes | Positionnement des mini fentes | | Distance entre deux centroïdes consécutifs: $3660 \pm 35 \mu\text{m}$ suivant l'axe x $7326 \pm 100 \mu\text{m}$ suivant l'axe y | |
| | Ecart entre chaque mini fente | | $174 \pm 69 \mu\text{m}$ suivant l'axe x | |
| Dimensionnement de la pupille de sortie | | | | $4.05 \leq f/D \leq 4.5$ suivant l'axe x $8.1 \leq f/D \leq 9$ suivant l'axe y |

Tableau 4- 2 : Liste des tests sur banc optique du prototype MUSE

5 Résultats et comparaisons

Ce paragraphe donne les principaux résultats de tests effectués sur le prototype MUSE au laboratoire du CRAL après installation et alignement du banc optique. Cette étape de qualification de prototype pour l'instrument MUSE fut une période clé au sein du projet puisqu'elle a clôturé la phase A. Les résultats ci-dessous sont extraits du rapport d'analyse et de tests remis à l'ESO [8]. Afin de couvrir tout le domaine spectral de MUSE, toutes les acquisitions ont été faites à trois longueurs d'onde (436, 577 et 823 nm). De plus, elles sont corrigées du chromatisme axial et latéral de la détection et des erreurs du détecteur CCD (biais, dark et flat). Un balayage suivant l'axe optique avec des pas calculés en fonction de la profondeur de champ dans le plan étudié est réalisé afin de trouver le meilleur foyer pour chaque acquisition.

5.1 Mesures de rugosité et BRDF

Sur le miroir découpeur du prototype MUSE, la rugosité varie entre 1.90 à 2.23 nm. La mesure de BRDF donne une lumière diffusée de l'ordre de 1.2 à 1.4 % (Figure 4- 14).

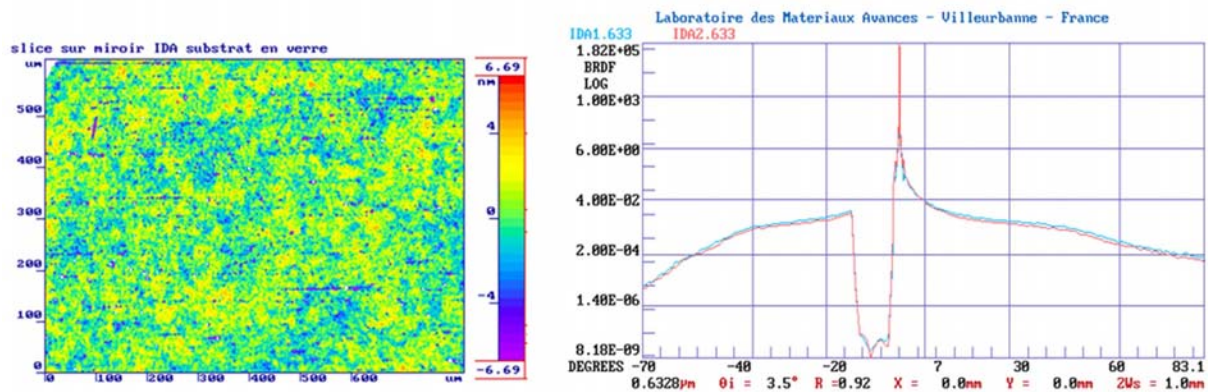


Figure 4- 14 : A gauche : Mesure de rugosité sur le slice n°19. A gauche : Mesure de BRDF au centre des slices n°19 et 20

5.2 Plan des pupilles intermédiaires

Ce test a pour but de mesurer les positions absolues et relatives des images de la pupille du télescope afin de les convertir en erreurs angulaires sur le miroir découpeur et de calculer la marge optique dans le plan des pupilles intermédiaires. Quatre images de la pupille du télescope sont enregistrées simultanément sur la caméra CCD. La Figure 4- 15 présente les 12 images de la pupille du télescope correspondant aux 12 slices actives du prototype MUSE.

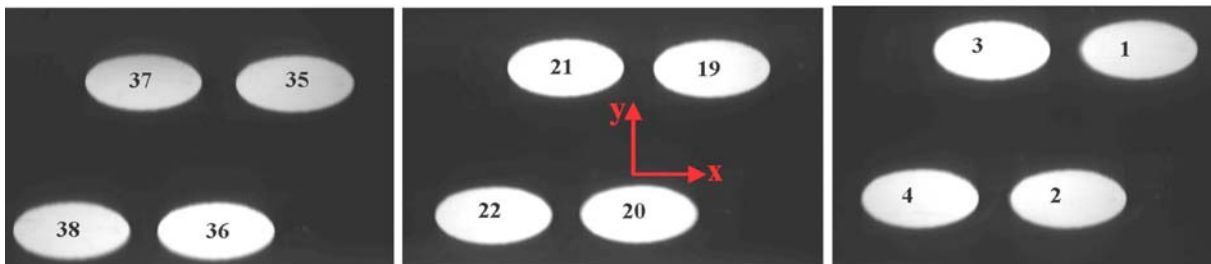


Figure 4- 15 : Images brutes des images de la pupille du télescope

Un logiciel traite les images afin de calculer le diamètre de chacune d'entre elles et leurs positions relatives et absolues. Ce dernier repose sur un calcul de centroïde géométrique basé sur la FWHM de la pupille. Pour le calcul des positions absolues, la référence est l'axe optique matérialisée par un trou dans le masque pupille placé dans le plan des pupilles intermédiaires. La reproductibilité de la mesure de centroïde est de $\pm 10 \mu\text{m}$ suivant les axes x et y.

Pour toutes les images des pupilles, si on superpose les PLR, on obtient une marge optique supérieure à 18% pour une spécification de 10%.

La Figure 4- 16 illustre les écarts aux valeurs théoriques des positions absolues des images de la pupille du télescope correspondant à chaque slice suivant l'axe x. Trois tendances se distinguent :

- La position absolue de 9 slices est conforme aux spécifications,
- Elle est légèrement supérieure à la spécification pour la slice n° 4 avec un écart de $60 \mu\text{m}$. Cette erreur est tout de même acceptable pour l'instrument,
- Elle est quatre fois supérieure à la spécification pour la slice n°35 ($-200 \mu\text{m}$) et n°36 ($170 \mu\text{m}$).

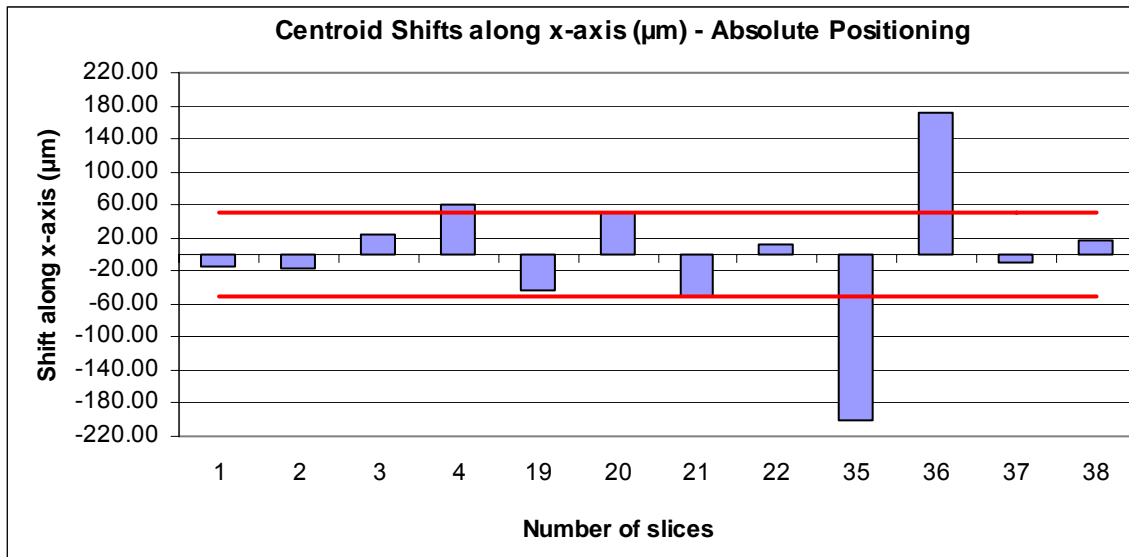


Figure 4- 16 : Ecart aux valeurs théoriques des positions absolues des images de la pupille du télescope suivant l'axe x

Le positionnement relatif suivant l'axe x est en concordance avec le positionnement absolu des pupilles intermédiaires, montrant les erreurs angulaires des slices n° 35 et 36.

Pour trouver l'origine de cette anomalie, les surfaces de référence (latérale et arrière) utiles lors de l'assemblage du miroir découpeur ont été contrôlées à l'interféromètre. Sur la Figure 4- 17, la référence optique est la slice n°21 et on remarque que la slice n°36 est tiltée. En comptant le nombre de franges, l'erreur angulaire sur la surface arrière est de $160 \mu\text{m}$ (soit 28 secondes d'arc) et elle est de $200 \mu\text{m}$ (soit 35 secondes d'arc) sur la surface latérale. Ces résultats sont en accord avec l'erreur angulaire constatée sur la slice n°36 lors de la mesure dans le plan des pupilles intermédiaires. De plus, la perpendicularité de toutes les slices, y compris la n°36, est inférieure à la spécification de 15 secondes d'arc. Par contre, on ne retrouve aucun effet similaire sur la slice n°35.

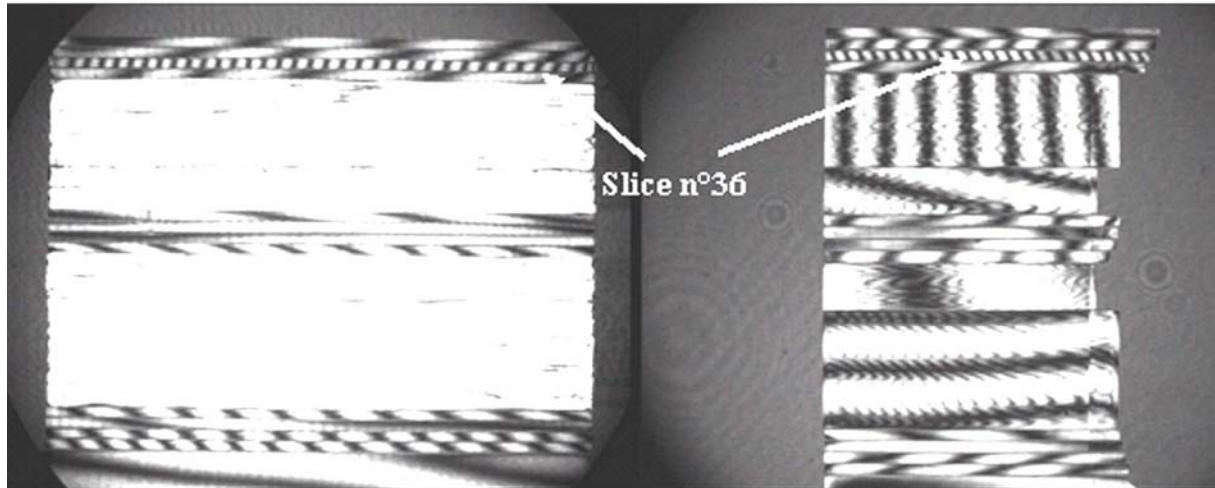


Figure 4- 17 : A gauche : Interférogramme de la face arrière du miroir découpeur. A droite : Interférogramme de la face latérale du miroir découpeur.

Nous pouvons donc conclure que la slice n°35 présente une erreur de fabrication qui n'a pas pu être expliquée par le fournisseur. Quant à la slice n°36, une erreur d'assemblage a été réalisée malgré la qualité de l'outil optique d'assemblage. Cette erreur aurait pu aisément être évitée au moyen d'un contrôle optique intermédiaire durant l'assemblage. Malheureusement, le planning très serré imposé à Cybernétix n'a pas permis de le réaliser.

Les positions absolues des centroïdes des pupilles intermédiaires suivant l'axe y sont conformes aux spécifications de $\pm 100 \mu\text{m}$ (Figure 4- 18).

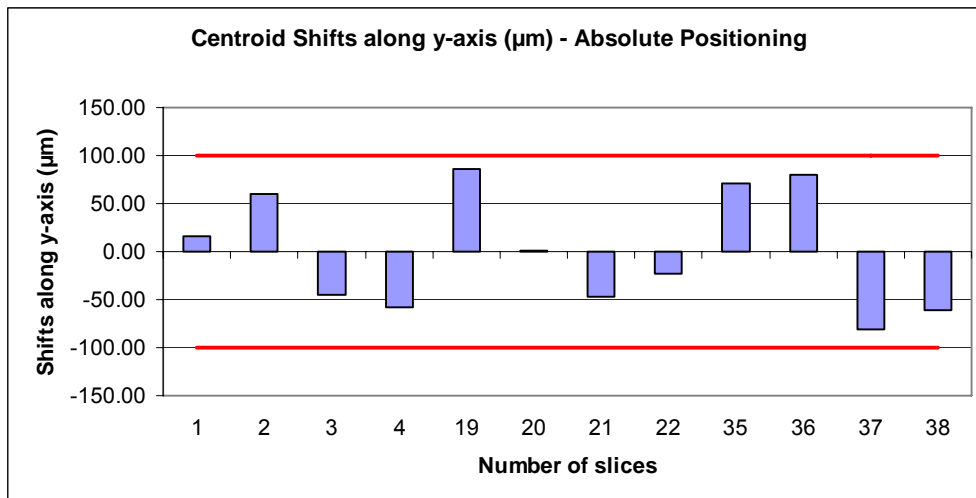


Figure 4- 18 : Ecart aux valeurs théoriques des positions absolues des images de la pupille du télescope suivant l'axe y

5.3 Plan de la pseudo-fente

Le plan de la pseudo fente représentant un réarrangement du champ de vue du télescope est primordial puisqu'il constitue la fente d'entrée du spectrographe. Des mesures d'alignement, de grandissement du système et de qualité image sont effectuées dans ce plan.

5.3.1 Alignement et caractéristiques de la pseudo fente

Tous les éléments composant le prototype MUSE sont installés sur le banc optique afin de visualiser la pseudo fente. Le but de ce test est de valider le grandissement du système découpeur d'image et de vérifier que les mini fentes ne se chevauchent pas. Quatre images de slices sont simultanément acquises sur le détecteur. La Figure 4- 19 présente la pseudo fente composée de 12 mini fentes.

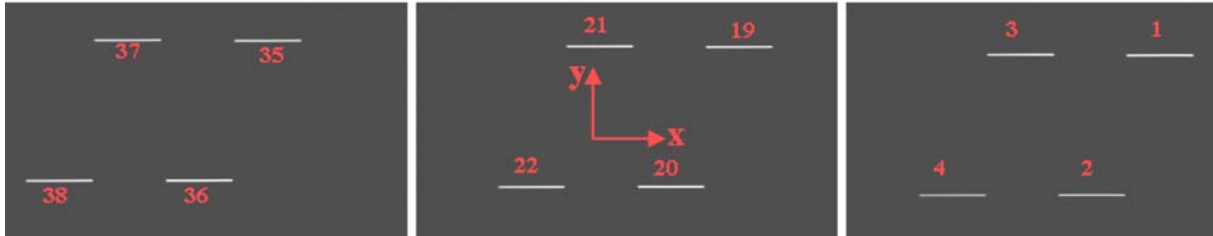


Figure 4- 19 : 12 mini fentes constituant la pseudo fente

L'incertitude de mesure du centroïde est de $\pm 10 \mu\text{m}$. En calculant le centroïde et la longueur de chaque mini fente (sur un critère de FWHM), on trouve que la distance entre chaque mini fente est conforme à la spécification de $174.5 \pm 69 \mu\text{m}$ pour les trois longueurs d'onde (Figure 4- 20). En revanche, si le seuil de détection du centroïde et de la longueur de chaque mini fente est situé à trois fois l'écart type du bruit, on constate que la distance entre chacune d'entre elles diminue, notamment à 823 nm où elle devient proche de zéro. Ceci est dû à une diffusion interne du doublet L2 et plus particulièrement de sa lentille en SF11 (Figure 4- 21). Il s'agit pourtant un matériau classique utilisé dans les instruments optiques mais dont le constructeur a perdu la traçabilité. On peut supposer que ce verre a été pollué lors de sa fonte. Dans le futur, les contrôles et les vérifications devront être plus stricts. Malgré tout, on n'observe aucun chevauchement des mini fentes à toutes les longueurs d'onde. Toutes les mesures à 823 nm sont entachées d'erreur à cause du doublet L2.

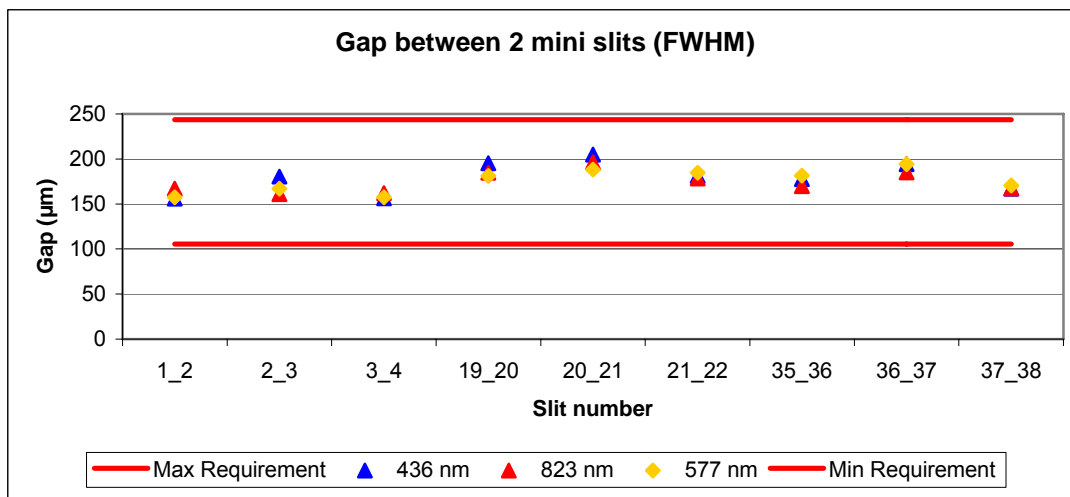


Figure 4- 20 : Distance entre chaque mini fente aux trois longueurs d'onde de mesures

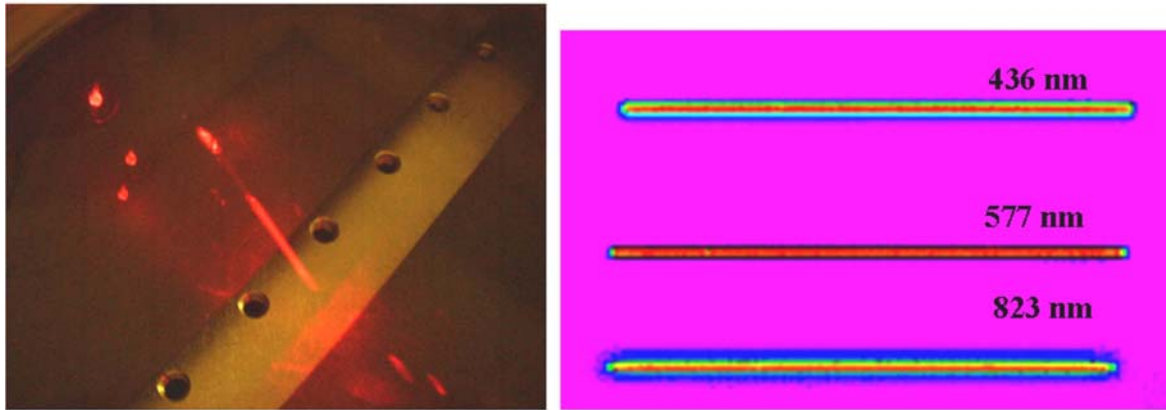


Figure 4- 21 : A gauche : Illustration de la diffusion du doublet L2 par un laser à 633 nm. A droite : Mini fente à trois longueurs d'onde au meilleur foyer

En conclusion, l'alignement des mini fentes est précis et en concordance avec les spécifications.

En modifiant légèrement la détection afin d'augmenter son grandissement d'un facteur quatre, une seule image de mini fente est imagée sur le détecteur CCD. Sur la Figure 4- 22, on remarque un léger vignettage du à l'optique de détection.

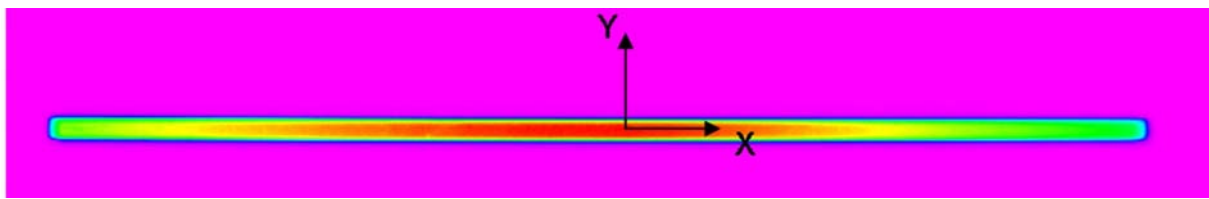


Figure 4- 22 : Mini fente correspondante à la slice n°2 mesurée à 577 nm

L'incertitude de mesure est de $\pm 3 \mu\text{m}$ sur la longueur de fente et de $\pm 5 \mu\text{m}$ sur la largeur. En FWHM, la longueur de chaque mini fente coïncide avec la spécification de $3.49 \pm 0.08 \text{ mm}$ (Figure 4- 23). En revanche, la largeur en FWHM est inférieure à la spécification de $69 \pm 2 \mu\text{m}$ (Figure 4- 24). La marge d'erreur de $2 \mu\text{m}$ est difficilement détectable avec la détection mise en place qui n'est pas appropriée à la mesure de largeur de fente. La forme géométrique de la mini fente est donnée par le produit de convolution de la PSF du système avec l'image géométrique de la slice. Le résultat du produit de convolution donne une image plus étendue suivant l'axe y que suivant l'axe x. Etant donné que la mesure de longueur de la mini fente est correcte, on peut considérer que le grandissement du système est conforme à sa spécification de 0.043 ± 0.001 . La mesure de largeur est alors considérée comme acceptable au vu des incertitudes (Figure 4- 24).

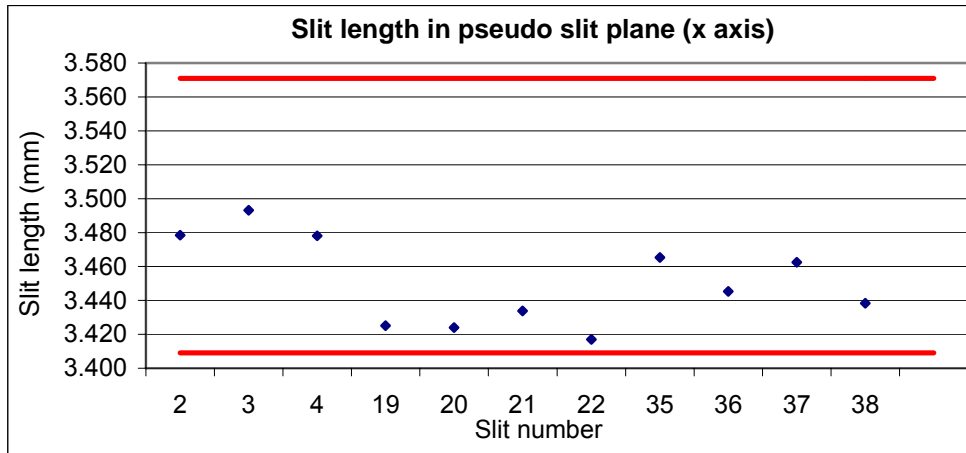


Figure 4- 23 : Longueur en mm des mini fentes

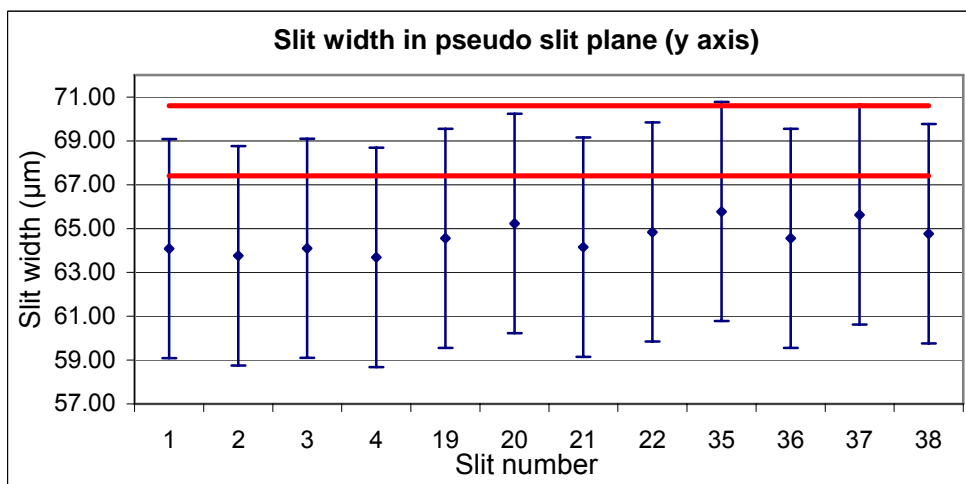


Figure 4- 24 : Largeur en mm des mini fentes

5.3.2 Tests sur la qualité image du système découpeurs d'images

Afin d'évaluer la qualité image du prototype MUSE, la PSF est étudiée dans le plan de la pseudo fente aux trois longueurs d'onde (436, 577, 823 nm). Quatorze PSF sont imagées sur chaque slice recouvrant ainsi un sous champ entier de MUSE. La détection présente un fort grandissement afin d'obtenir une résolution correcte des PSF. Pour obtenir un signal sur bruit supérieur à 100, le temps d'acquisition est de l'ordre de une minute.

L'énergie dans un rectangle est calculée pour chaque PSF imagée sur chaque slice. Le logiciel soustrait une constante correspondant à la moyenne d'un carré situé à 100 μm de la PSF, calcule le centroïde géométrique de cette dernière et l'énergie dans un rectangle de 35×70 μm de coté. L'incertitude de mesure exprimée en pourcentage d'énergie est de ±3 %. Cette valeur importante est due à la difficulté de soustraction du bruit. Sur la Figure 4- 25, le rectangle rouge illustre la spécification. On remarque que les PSF sont de symétrie de révolution au centre des slices n°19, 20, 21 et 22. En revanche, elles deviennent élargies et ne sont plus de symétrie de révolution aux extrémités du miroir découpeur et aux extrémités du domaine de longueur d'onde MUSE. Ceci correspond aux calculs donnés par Zemax.

A 577 nm, la plupart des PSF contiennent en moyenne 86% d'énergie dans un rectangle de 35×70 μm. Sur la Figure 4- 26, on remarque que l'énergie dans un rectangle sur la slice n°2 est anormalement faible (70%). A 436 et 823 nm, les conclusions sont identiques. Toutefois,

la moyenne de toutes les PSF est supérieure à 85 % d'énergie dans $35 \times 70 \mu\text{m}$. À cause de la diffusion de L2, la PSF à 823 nm est plus étendue qu'aux autres longueurs d'onde. Globalement, la qualité image sur le système découpeur d'images MUSE a été jugée correcte.

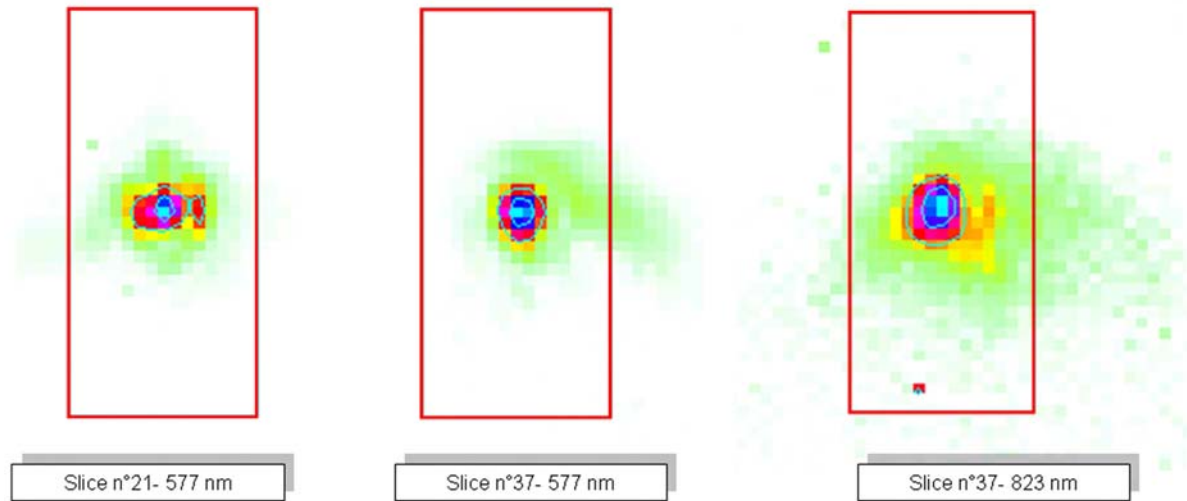


Figure 4- 25 : De gauche à droite : PSF à 577 nm sur la slice n°21, PSF à 577 nm sur la slice n°37 et PSF à 823 nm sur la slice n°37

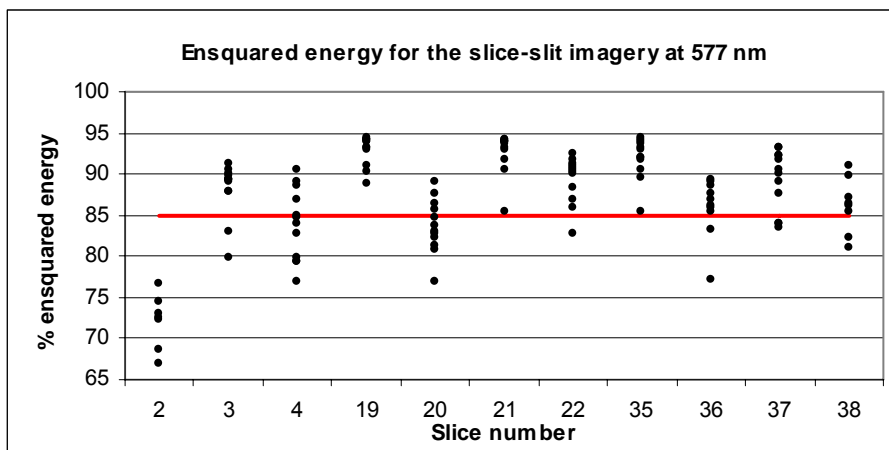


Figure 4- 26 : Energie dans un rectangle de toutes les PSF mesurées en laboratoire sur la surface utile du miroir découpeur

5.4 Plan de la pupille de sortie

Le but de ce test est de vérifier les dimensions de la pupille de sortie afin de connaître le nombre d'ouverture de sortie du système. La pupille de sortie globale, correspondant à un groupe de 4 slices observée au foyer d'un objectif est représentée sur la Figure 4- 27.

L'incertitude de mesure sur le nombre d'ouverture est élevée à cause de la superposition de 4 pupilles donnant des bords flous autour de la pupille globale (± 0.17 suivant l'axe x, ± 0.33 suivant l'axe y). Le nombre d'ouverture est conforme à la spécification donnée dans le Tableau 4- 2 suivant les deux axes x et y à 436 et 577 nm (Figure 4- 28). En revanche, ce nombre d'ouverture n'a pas pu être évalué à 823 nm à cause de la diffusion de L2 (Figure 4- 27, à droite). L'ellipse rouge représente la dimension de la pupille de sortie théorique.

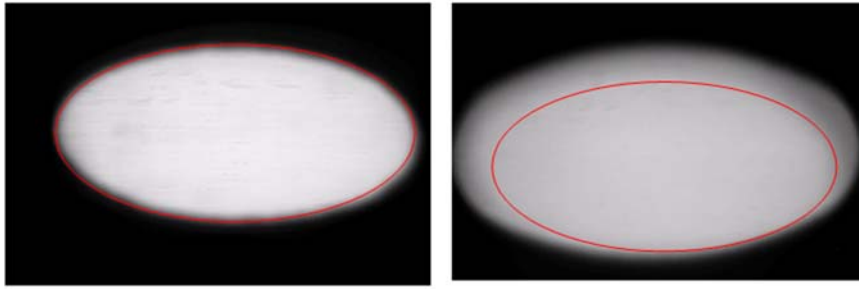


Figure 4- 27 : A gauche : Pupille de sortie à 577 nm. A droite : Pupille de sortie à 823 nm

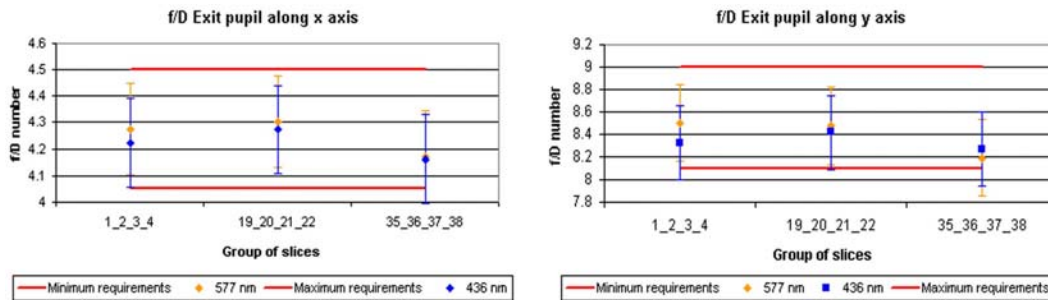


Figure 4- 28 : Nombre d'ouverture de sortie du système découpeur d'images MUSE suivant les axes x et y

6 Conclusion

Ce chapitre complète les études présentées au Chapitre 3 sur les prototypes CRAL et ESA. Cette application, dédiée au VLT, montre la faisabilité d'un système découpeur d'images pour un instrument de seconde génération tel que MUSE. Ce chapitre a confirmé le procédé d'assemblage d'un miroir découpeur par adhésion moléculaire. En effet, cette dernière est d'autant plus difficile à réaliser que les surfaces en contact sont grandes. Le rapport longueur/largeur est passé de 20 à 50 entre le prototype CRAL et MUSE. De plus, le nombre de slices assemblées a augmenté, passant de 11 pour le prototype CRAL à 30 pour le prototype ESA et 38 pour celui de MUSE (Figure 4- 29). S'appuyant sur une solide expérience acquise sur les deux prototypes « verre » pour l'instrumentation du JWST, les tests du prototype MUSE se sont déroulés sans encombre. Ils ont permis d'établir une procédure d'alignement précise, répétable et rapide. De plus, en vue des AIT de l'instrument MUSE, un couplage automatique entre les platines motorisées de la détection et la caméra CCD a été développé, afin d'accélérer la recherche du meilleur foyer et de lancer une procédure automatique de recherche des images [9]. Ce nouveau concept de découpeur d'images associant miroir découpeur et mini lentilles, plus adapté aux grandes ouvertures de sortie, propose une alternative au système classique constitué de trois jeux de miroirs. Les résultats des tests ont montré l'alignement correct des images des pupilles intermédiaires malgré deux slices hors spécifications. La précision sur les angles des slices était cinq fois plus stricte que sur le prototype ESA. L'alignement de la pseudo fente est excellent, ne créant pas de chevauchement entre les mini fentes. La qualité image du système découpeur d'images est correcte. De plus, le système produit un nombre d'ouverture de sortie en accord avec celui du spectrographe MUSE. En construisant un modèle Zemax incluant les erreurs des deux slices n°35 et 36, on constate que le nombre d'ouverture de sortie reste dans les spécifications demandées.

Grâce aux trois prototypes CRAL, ESA et MUSE, la technologie « verre » développée sur les systèmes découpeurs d'images est aujourd'hui mure et applicable à une instrumentation sol ou spatiale. Un article [10] a été soumis au journal « New Astronomy Reviews » (Elsevier),

qui s'intitule « CRAL Activities on Advanced Image Slicers: Optical Design, Manufacturing, Assembly, Integration and Testing » et qui est en cours de révision. Il décrit l'activité de R&D sur les trois prototypes découpeurs d'images développés au CRAL. Atteignant aisément les performances de haut niveau définies par les scientifiques, les systèmes découpeur d'images en verre ne présentent plus qu'une seule zone d'ombre : leur coût de fabrication pour des instruments composés de plusieurs IFUs comme MUSE. Le CRAL a récemment entrepris des discussions avec des industriels afin de trouver des solutions permettant de réduire les coûts pour une production de série. La principale solution retenue est d'optimiser le design optique afin qu'il offre moins de paramètres optiques différents, et que l'on puisse maximiser le nombre de slices sous la sphère de polissage.

Parallèlement à cette étude, juste après la revue de fin de Phase A de MUSE, l'ESO a proposé un nouveau concept de système découpeur d'images. Ce design, beaucoup plus compact que le précédent, semble plus adapté à une fabrication en série, en utilisant les progrès de la technologie de l'usinage diamant. Le chapitre suivant présente trois prototypes fabriqués en métal, suivant deux méthodes d'assemblage différentes, et testés au laboratoire du CRAL.

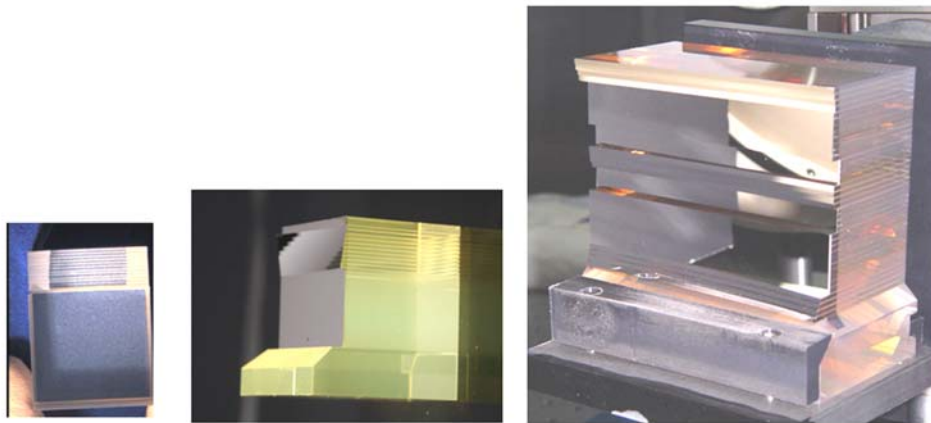


Figure 4- 29 : Trois prototypes testés au CRAL à échelle réelle. De gauche à droite : Prototype CRAL, prototype ESA, prototype MUSE

Références

1. www.eso.org
2. Hénault et al., 2004, "MUSE optomechanical design and performance", Proc. SPIE, 5492, 909
3. Laurent et al., 2005, "Optical design, manufacturing and tests of the MUSE image slicer", Proc. SPIE, 5465 (in press)
4. Hénault, F., 2002, "MUSE, a second-generation integral-field spectrograph for the VLT", Proc. SPIE, 4841, 1096
5. Hénault, F., 2003, "Statement of Work and Requirements of the Components of the Image Slicer Prototype", n° MUSE-MEM-TEC-028
6. Laurent, F., 2004, "MUSE Image slicer prototype test plan", n° MUSE-MEM-TEC-058
7. Renault, E., 2004, "Procédures d'alignement du banc proto slicer", n° OPT-MEM-TEC-012/2004
8. Laurent, F., 2005, "MUSE image slicer prototype test and analysis report", n° MUSE-MEM-TEC-066
9. Martin, F., 2004, « Manuel d'utilisation des routines du contrôle commande entre les platines motorisées et la caméra CCD du laboratoire optique », n° OPT-MEM-TEC-007/2005
10. Laurent et al., 2005, "CRAL activities on advanced image slicers: optical design, manufacturing, assembly, integration and testing", Elsevier (in prep)

CHAPITRE 5

**TESTS DE PERFORMANCES D'UN
DECOUPEUR D'IMAGES EN
TECHNOLOGIE « METAL ».**

**APPLICATION À L'INSTRUMENT MUSE
POUR LE VLT**

CHAPITRE 5

TESTS DE PERFORMANCES D'UN DECOUPEUR D'IMAGES EN TECHNOLOGIE « METAL ».

APPLICATION À L'INSTRUMENT MUSE POUR LE VLT

1 Introduction

A partir de mars 2004, suite à l'approbation de la Phase A délivrée par le comité scientifique et technique (STC) de l'ESO, l'instrument MUSE commence sa Phase de Design Préliminaire. Malgré tout, l'ESO demande qu'un effort important soit accompli sur une réduction des coûts de l'instrument. A la suite de l'analyse des budgets attribués à chacun des sous systèmes de MUSE, le découpeur d'images apparaît comme l'un des systèmes les plus coûteux car il met en jeu des composants optiques nombreux et complexes (914 slices différentes et 1872 lentilles). De plus, le design optique du découpeur d'images de MUSE est assez encombrant (environ 800 mm de longueur) au vu de la place disponible sur la plateforme Nasmyth. Ces deux inconvénients ont poussé l'ESO à réorienter le design du système découpeur d'images de MUSE, vers une solution plus compacte (de l'ordre de 200 mm), associant deux jeux de miroirs réfléchissants, plus adaptée à une production en série en utilisant la technologie de l'usinage diamant.

Ce chapitre présente le design optique de ce nouveau découpeur d'images. Pour vérifier ses performances optiques de haut niveau, afin de les comparer au système découpeur d'images en verre (Chapitre 4), trois prototypes ont été commandés. Chaque fournisseur est libre de choisir son matériau en adéquation avec sa méthode de fabrication et d'assemblage, lesquelles seront explicitées. De plus, des contrôles individuels des éléments optiques par mesure de BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), rugosité, profil de forme et angle des slices seront présentés. Enfin, un banc optique a été monté au CRAL en vue d'une caractérisation dans les différents plans pupille et champ des trois systèmes découpeurs d'images. Une conclusion comparative de ces prototypes métalliques sera faite afin de sélectionner le fournisseur le plus adapté à la fabrication des systèmes découpeurs d'images de l'instrument MUSE.

2 Design Optique

2.1 Présentation du système découpeur d'images de la Phase de Design Préliminaire

Comme dans le Chapitre 4, l'instrument MUSE est composé d'une optique d'entrée équipée d'un découpeur de champ et de relais optiques nourrissant 24 IFUs. Le découpage de champ est ici différent, passant d'un rectangle contenant 20''×7.5'' du champ de vue durant la Phase A à un rectangle très allongé de 60''×2.5'' pour la Phase de Design Préliminaire. Chaque rectangle est imagé sur un système découpeur d'images tout réfléchissant appelé Reflective Image Slicer – RIS, présenté sur la Figure 5- 2, et qui est composé de seulement deux matrices de miroirs [1] :

- Un miroir découpeur (Image Dissector Array – IDA). Il découpe le champ de vue rectangulaire en bande étroite et image la pupille d'entrée du télescope sur un plan intermédiaire. Le faisceau d'entrée est télécentrique, c'est à dire que la pupille d'entrée est située à l'infini. L'IDA est constitué de 5 blocs identiques de miroirs découpeur placés les uns à coté des autres suivant la direction orthogonale à la dispersion (Figure 5- 1). Chaque bloc est composé de 12 slices sphériques et tiltées autour de l'axe y. Le rayon de courbure est identique pour chaque slice – $R = 300 \pm 0.5$ mm – ce qui forme les images de la pupille d'entrée sur une surface sphérique suivant l'axe z situé entre les deux matrices de miroirs à environ 150 mm de l'IDA. De plus, ces images sont arrangées en escalier suivant quatre lignes et trois colonnes (Figure 5- 3). Les angles des slices sont différents mais ils sont antisymétriques. La précision de centrage de la sphère de polissage est de ± 50 μ m suivant l'axe x (représentant un angle θ_y de $30''$) et ± 100 μ m suivant l'axe y (soit $1'$ sur l'angle θ_x). La qualité image de la surface optique doit être inférieure à 1 μ m PTV. Les slices ont une longueur de 28.8 ± 0.1 mm pour une largeur de 1 ± 0.01 mm représentant un rapport Longueur/Largeur de 28.8 nettement inférieur à celui du prototype MUSE de Phase A. Le miroir découpeur est incliné d'un angle de 3.5° autour de l'axe x.
- Une matrice de miroirs secondaires (Focusing Mirror Array – FMA). Cette matrice a une double fonction : elle forme l'image de chaque slice dans le plan de la pseudo fente et image chaque pupille intermédiaire à l'infini, constituant ainsi la pupille d'entrée du spectrographe. Tout comme le miroir découpeur, le FMA est composé de 5 blocs identiques mis les uns à coté des autres (Figure 5- 1). Chaque bloc est constitué de 12 miroirs sphériques et tiltés autour de l'axe y. Chaque miroir a le même rayon de courbure – $R = 22.5 \pm 0.03$ mm. De ce fait, afin d'imager chaque image de slice dans un plan perpendiculaire à l'axe optique (situé à environ 12.15 mm du FMA), chaque miroir doit être décalé suivant l'axe z de 87 μ m en respectant la formule suivante $Z_{i+1} = Z_i + 87\mu m$, où z est l'altitude suivant l'axe optique du miroir et i le numéro du miroir. L'angle d'un miroir secondaire est identique à celui de sa slice associée. La précision de fabrication sur le centre de courbure est de ± 20 μ m suivant l'axe x (soit un angle θ_y de $2'$) et ± 50 μ m suivant l'axe y (soit un angle θ_x de $5'$). La qualité image de la surface optique doit être inférieure à 0.25 μ m PTV. Les miroirs secondaires du FMA sont rectangulaires avec une longueur de 6 mm et une hauteur de 2 mm et sont situés à environ 161.3 mm de l'IDA. L'angle d'incidence entre l'IDA et FMA est de 10° .

L'avantage de ce découpeur d'images réside dans sa compacité (longueur < 200 mm) mais celle-ci complique les Assembly Integration and Tests – AIT – à cause du faible volume réservé aux supports mécaniques et de l'utilisation d'optiques de relais à grande ouverture placées loin des plans étudiés. Le Tableau 5- 1 résume les valeurs d'entrée/sortie du RIS.

Le même type de découpeur d'images à deux matrices de miroirs a déjà été implémenté dans l'instrument opérationnel UIST, dont l'Université d'Edinburgh était responsable [2], et est en cours d'étude dans l'instrument MIRI du JWST [3].

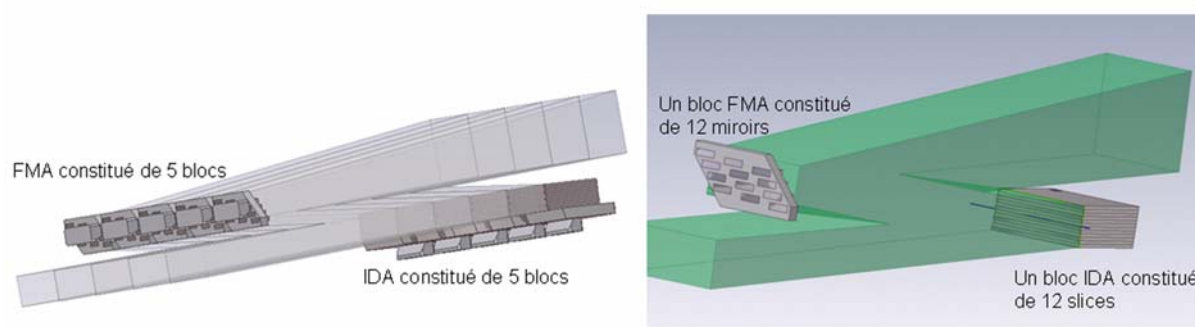


Figure 5- 1 : Système découpeur d'images de MUSE. A gauche : Dessin mécanique global avec cinq blocs constituant IDA et FMA. A droite : Dessin mécanique d'un bloc d'IDA et FMA

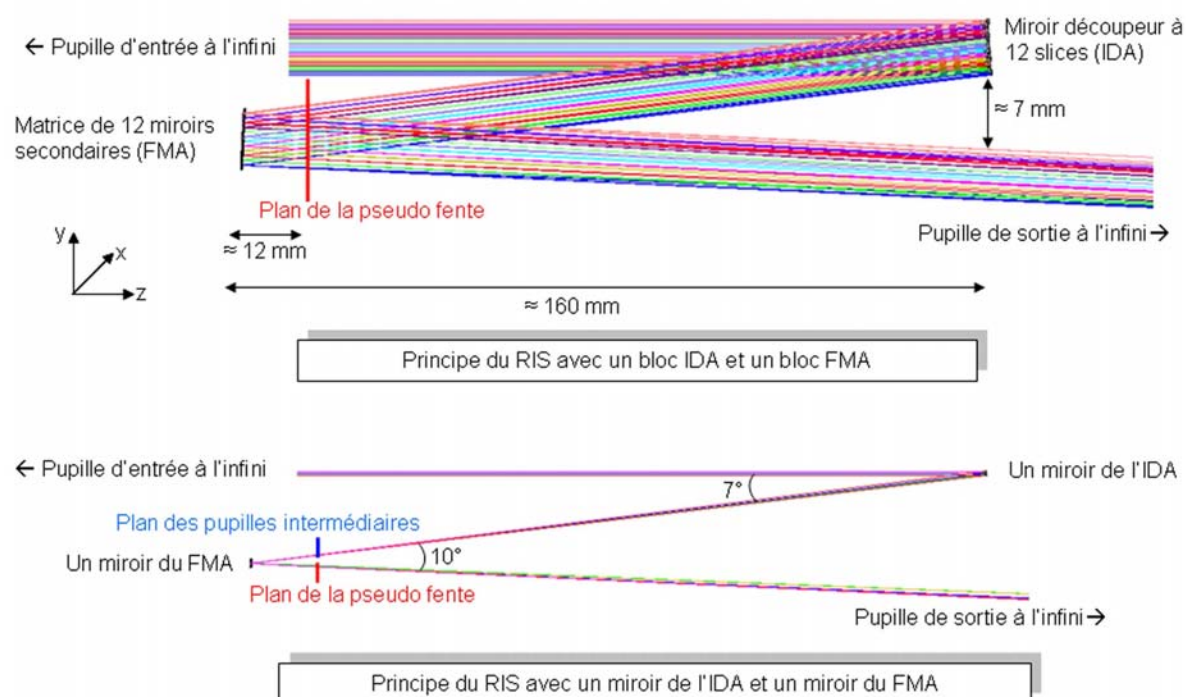


Figure 5- 2 : Design optique du RIS. En haut : 12 miroirs composant chaque IDA et FMA. En bas : Visualisation du design optique pour un seul jeu de miroirs

| | IFU MUSE |
|--|--|
| Nombre F/D en entrée suivant l'axe x | 60 |
| Nombre F/D en entrée suivant l'axe y | 120 |
| Nombre F/D en sortie suivant l'axe x | 4.5 |
| Nombre F/D en sortie suivant l'axe y | 9 |
| Position (mm) suivant l'axe z de la pupille d'entrée | infini |
| Grandissement du système découpeur d'images | 0.075 |
| Energie encerclée dans le plan de la pseudo fente | 85% dans un rectangle de 35x70 μ m |

Tableau 5- 1 : Spécifications d'entrée/sortie du RIS

2.2 Caractéristiques du prototype

Pour valider le concept de ce nouveau découpeur d'images à deux matrices de miroirs, le CRAL a consulté plusieurs entreprises susceptibles de fabriquer un tel prototype en métal, en utilisant la technologie de l'usinage diamant. Après fabrication, ce prototype devra être testé individuellement puis, sur banc optique afin de le caractériser. Ce prototype dont les spécifications sont rassemblées dans le document [1] est constitué de (Figure 5- 3) :

- Une matrice de 12 slices représentatives d'un bloc parmi les 5 disponibles sur le découpeur d'images MUSE,
- Une matrice de 12 miroirs secondaires, eux-mêmes représentatifs de la barrette complète.

Chaque matrice a été fournie avec un support mécanique identique en forme de queue d'aronde afin de conserver les mêmes références d'alignement et de réglage sur le banc optique.

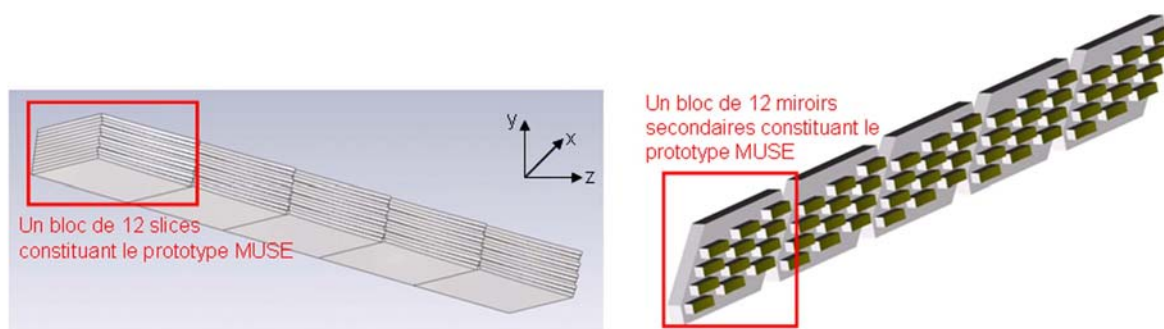


Figure 5- 3 : Représentation des éléments optiques représentatifs du prototype MUSE

Ces prototypes ont pour but de démontrer :

- La fabrication et l'assemblage de 12 slices et miroirs secondaires aux tolérances demandées,
- La validation du prototype à travers ses performances optiques.

L'activité de caractérisation des prototypes a été longue (18 mois), puisque trois fournisseurs proposant trois approches différentes en matière de fabrication, assemblage et choix des matériaux, ont été sélectionnés. Le planning de cette activité est résumé dans la Figure 5- 4.

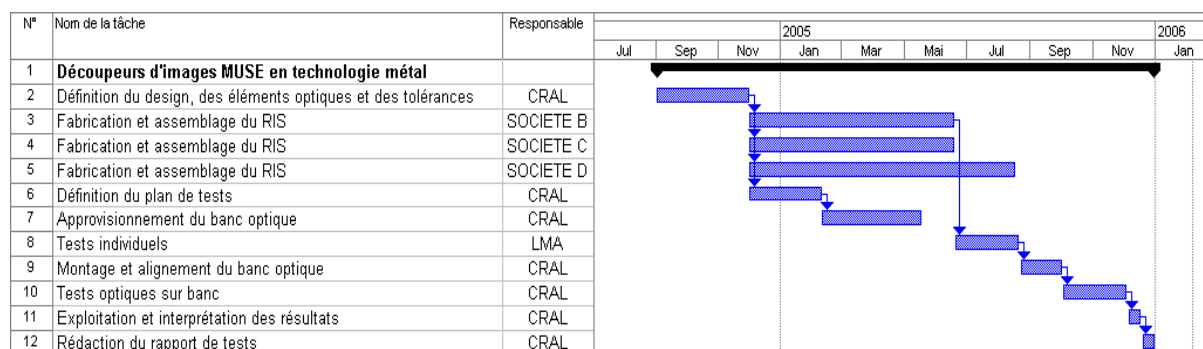


Figure 5- 4 : Planning des activités sur les prototypes MUSE

3 Fabrication

Plusieurs instruments ou prototypes de découpeurs d'images en métal ont déjà été fabriqués et testés pour une instrumentation dans le domaine infrarouge. Parmi ceux-ci, l'instrument GNIRS en possède un, réalisé en Aluminium par la société B [4]. Un prototype de PIRIS [5]

et le découpeur d'images FISICA [6] ont, quant à eux, été fabriqués par la société D. Ayant une première expérience dans la fabrication de systèmes découpeurs d'images, ces deux fournisseurs ont été contactés et retenus pour la fabrication du prototype MUSE présenté au paragraphe 2.2. Un troisième fournisseur, société C, a aussi été sélectionné pour la fabrication du prototype, puisqu'il possède un des plus grands parcs de machines d'usinage diamant existant en France. Pour les trois prototypes, les tests individuels de rugosité, BRDF, profil de forme et mesure angulaire ont été effectués au Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA). Les tests sont détaillés dans le plan de tests [8] et leurs principaux résultats sont donnés par le Tableau 5- 2.

3.1 Techniques de fabrication : Usinage diamant

L'usinage diamant est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance. Il existe deux manières de générer la surface recherchée :

- Par travail d'enveloppe. La trace de l'arête de l'outil travaille pour donner la surface finale (Tournage).
- Par travail de forme. La forme de l'outil conditionne la surface finalement obtenue (Fraisage).

De nos jours, des machines à commandes numériques (CN), c'est-à-dire asservies par un système informatique, permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure. L'usinage diamant permet une production rapide et économique des surfaces asphériques et des optiques pour l'infrarouge. Ces dernières années, de nouvelles machines d'usinage diamant multi-axes ont émergé sur le marché.

Etant donné le caractère confidentiel de la fabrication, il est plus ou moins difficile d'obtenir des informations concrètes sur les différents processus utilisés. Seules quelques lignes résumeront ici les procédés de fabrication des prototypes.

3.1.1 Tournage (Diamond turning)

Le tournage est un procédé d'usinage fondé sur l'utilisation d'un tour. En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation à très grande vitesse de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant (Figure 5- 5). La combinaison de ces deux mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux. Un tour permet de fabriquer principalement des pièces de révolution et de petits diamètres même si certaines machines peuvent réaliser des formes très complexes.

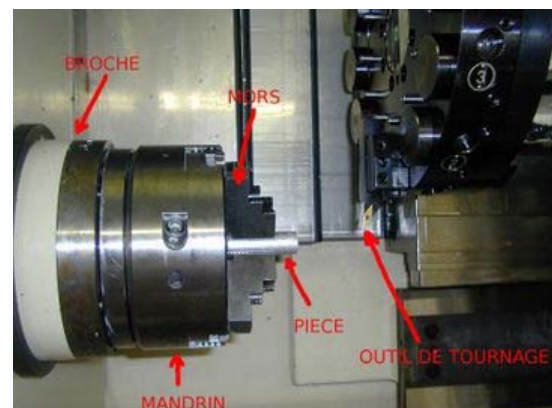


Figure 5- 5 : Tour à commande numérique

3.1.2 Fraisage (Fly cutting)

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière. Il se caractérise par le recours à une machine-outil : la fraiseuse (Figure 5- 6). En fraisage, l'enlèvement de matière (sous forme de copeaux) résulte de la combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe appelé fraise à grande vitesse d'une part, et avance de la pièce à usiner d'autre part. La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, si la machine est équipée de CN, de réaliser tout type de formes, mêmes complexes.



Figure 5- 6 : Fraiseuse à commande numérique

Afin d'améliorer la qualité de surface finale, après usinage, il est possible de repolir à la main et individuellement celle-ci. Cette technique est appelée post polissage.

3.2 Fabrication et contrôles du prototype de la société B

La société B est une unité scientifique d'une université européenne développant de l'ingénierie de précision. Ils ont choisi de fabriquer l'IDA et le FMA en Aluminium (Al T6061) en utilisant le procédé de fly cutting sans post polissage pour les deux matrices de miroirs [7]. Chaque slice a été fabriquée individuellement puis assemblée, tandis que le FMA est constitué d'une pièce unique et monolithique. Une première version des composants optiques de MUSE a été réalisée. A cause d'un mouvement de vibration de l'outil, la rugosité des surfaces optiques atteignait 25 nm. Un second jeu a alors été fabriqué. La pièce optique est placée sur un mandrin qui se déplace suivant l'axe z, permettant de réaliser la courbure du miroir (Figure 5- 7). L'outil, de taille et de forme variable suivant les caractéristiques des pièces à usiner, tourne à grande vitesse et se déplace le long des axes x et y par des mouvements de va et vient. Ce mouvement associé au procédé de fly cutting crée une surface concave et toroïdale avec une structure alvéolaire (Figure 5- 8).

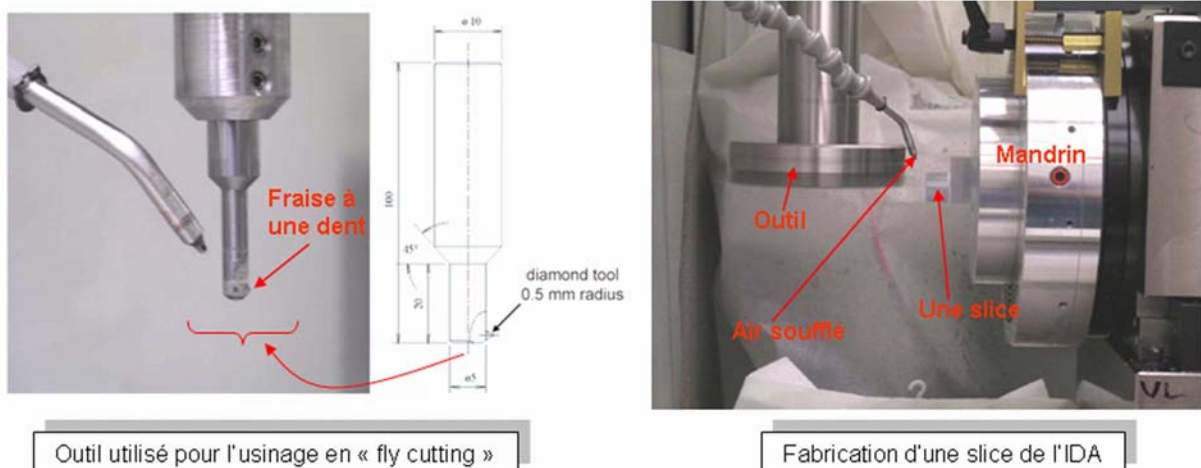


Figure 5- 7 : Illustration des outils utilisés lors de la fabrication de l'IDA et du FMA en fly cutting

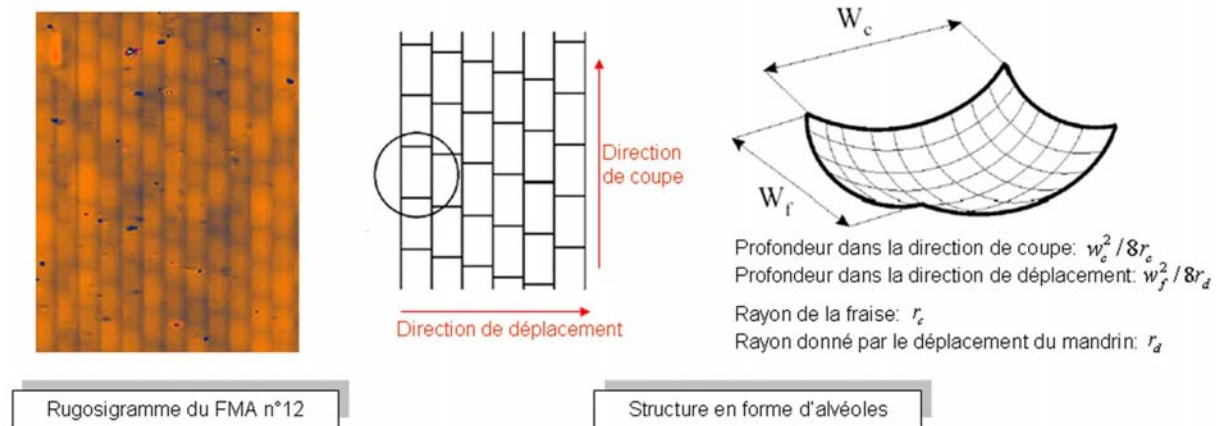


Figure 5- 8 : A gauche : Rugosigramme d'un FMA réalisé par LMA. A droite : Explication de la structure en forme d'alvéoles

Après contrôle de certaines slices et de certains miroirs secondaires du FMA au LMA, la rugosité des surfaces optiques se révèle hors spécifications (> 8 nm RMS). Cette rugosité entraîne une lumière diffusée conséquente, de l'ordre de 5 % évaluée à l'aide d'un banc de mesure de BRDF. De plus, le rugosigramme associé à la mesure du profil des slices révèle une surface toroïdale, ce qui illustre parfaitement le procédé de fabrication par fly cutting (Figure 5- 8). Les surfaces optiques sont également entachées d'un nombre important de petits trous de 3 μ m de diamètre et de profondeur maximale de 400 nm. Les résultats des tests du LMA sont présentés dans le Tableau 5- 2.

3.3 Fabrication et contrôles du prototype de la société C

La société C est une société spécialisée dans la fabrication d'optiques plastiques, mais possède aussi une solide expérience dans la fabrication d'optiques asphériques en usinage diamant. C'est dans ce contexte qu'elle a proposé une solution de fabrication et d'assemblage du prototype MUSE. Les miroirs composants l'IDA et le FMA ont été fabriqués individuellement en usinage diamant puis ont été assemblés mécaniquement. Les slices sont en Invar, matériau très dur, n'acceptant que peu de déformations lors de l'usinage. Le procédé de fabrication est illustré par la Figure 5- 9. Une cale de précision (Hasberg) de 1.1 ± 0.01 mm de largeur constitue une première ébauche géométrique de la slice. Au centre de cette cale, deux trous de 5 mm de diamètre espacés de 12 mm sont percés, servant de référence lors de la fabrication. La surface sphérique est alors ébauchée dans la cale. Les bords de chaque slice sont dégagés afin de déposer une fine couche de 250 μ m de nickel phosphoré sur l'ébauche de la surface sphérique. Le nickel a comme particularité d'être relativement inoxydable à l'air et donne une qualité de surface meilleure que sur les métaux bruts. Ensuite, la slice est rectifiée afin d'atteindre son épaisseur théorique de 1 mm. Toutes les slices sont fabriquées suivant ce même processus. Chaque slice est alors prise en sandwich, grâce à des jeux de vis, entre deux cales rectifiées et elles sont positionnées ensemble sur une roue de 700 mm de diamètre. Le positionnement en x, y et z des slices sur la roue d'usinage est crucial puisqu'il détermine l'angle théorique de chaque slice. Ces dernières sont alors toutes usinées en même temps à l'aide d'un outil de 300 mm de rayon de courbure, leur garantissant un rayon de courbure identique. Enfin, chaque slice est repolie à la main afin d'atteindre la spécification de rugosité (< 5 nm RMS). Le rayon de courbure de chaque slice a été contrôlé individuellement à 300 mm.

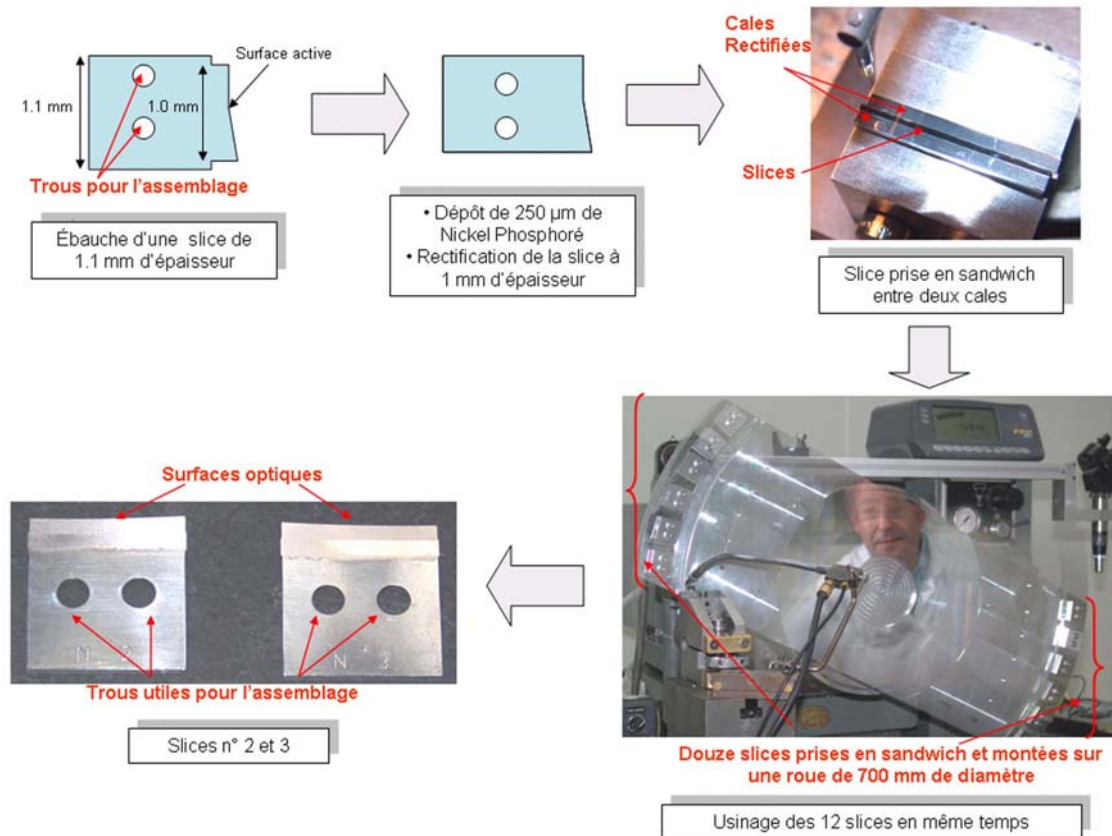


Figure 5- 9 : Processus de fabrication des slices composant l'IDA

Les miroirs secondaires de FMA bénéficient du même procédé de fabrication que les slices. Seuls quelques différences subsistent. En effet, ils sont en fortal et possèdent trois trous de 1 mm de diamètre espacés de 2 mm pour l'assemblage (Figure 5- 10). De plus, en fin de processus de fabrication, les miroirs ne sont pas repolis car la machine permet d'atteindre directement la rugosité demandée.

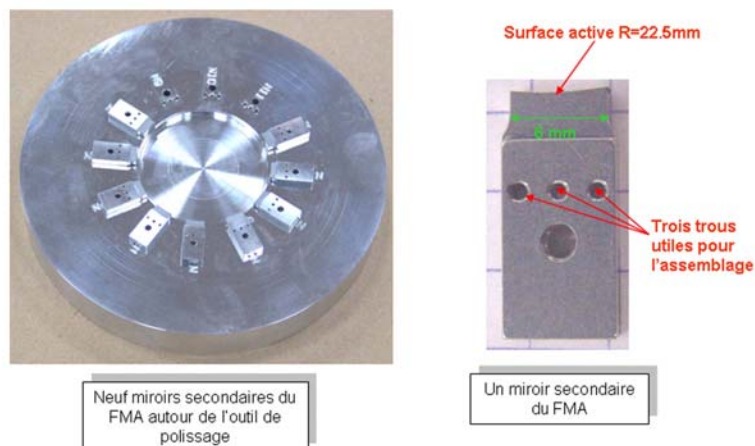


Figure 5- 10 : Processus de fabrication des miroirs du FMA

Les tests de rugosité et de BRDF montrent une excellente rugosité inférieure à 3 nm RMS, un TIS (Total Integrated Scatter) de l'ordre de 0.5 %, sur tous les miroirs de l'IDA et du FMA (Figure 5- 11). Toutefois, des structures longitudinales dues à la trace de l'outil lors de l'usinage sont visibles sur les miroirs du FMA, puisque ceux-ci n'ont pas été repolis (Figure 5- 11). Le rayon de courbure des slices a été mesuré proche de 310 mm au lieu de 300 mm.

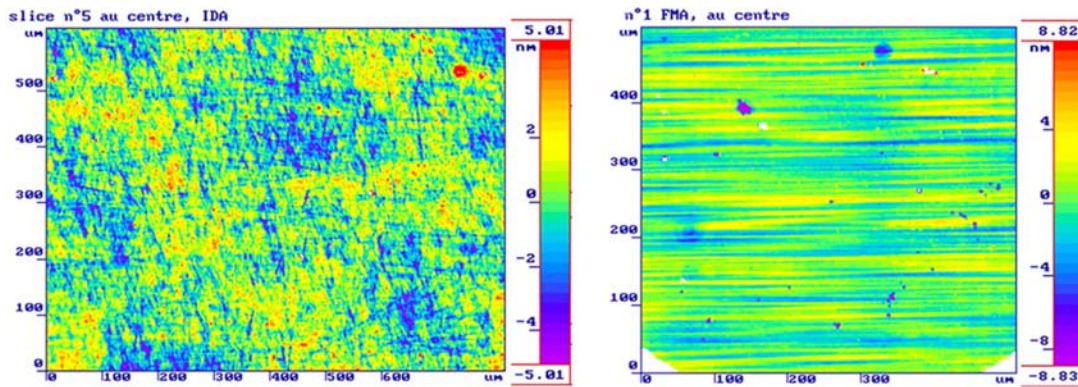


Figure 5- 11 : Rugosité du prototype de la société C. A gauche : Rugosigramme de la slice n°5. A droite : Rugosigramme du miroir FMA n°1

3.4 Fabrication et contrôles du prototype de la société D

Le troisième prototype de MUSE a été fabriqué par la société D. Très peu d'informations ont été échangées sur le processus de fabrication. Chaque matrice, IDA et FMA, a été fabriquée en une pièce unique en Cuivre. Pour pouvoir usiner un découpeur d'images monolithique, seul le procédé de fly cutting peut être utilisé. Ainsi, les éléments optiques d'une pièce monolithique ne peuvent pas être repolis après usinage.

La Figure 5- 12 montre que la rugosité des slices est élevée (≈ 7 nm RMS) mais la mesure du TIS est de l'ordre de 0.33 % (Figure 5- 13). Il y a une incompatibilité entre ces deux résultats. L'explication la plus vraisemblable est que la rugosité est mesurée sur une zone trop large (un carré de 600 μm de côté). Or, la forme de la slice suivant la direction de dispersion (axe y) n'est pas une sphère (Figure 5- 14). Pour évaluer la rugosité d'une surface, l'expérimentateur retranche habituellement une surface standard de type sphérique ou plan ce qui n'est pas le cas pour les slices du prototype de la société D. La mesure de rugosité peut donc être faussée par les résidus de la soustraction de cette surface standard. De plus, le profil de forme des slices aura des conséquences sur les caractéristiques du système optique. En effet, ce profil de forme – plans inclinés sur les deux bords de la slice sur 250 μm chacun et plan au centre sur 500 μm – engendrera un élargissement de la pupille suivant l'axe y dans les plans des pupilles intermédiaires et de sortie (Figure 5- 14). Malgré une structure en quadrillage, la rugosité des miroirs du FMA, est inférieure à 1.4 nm RMS.

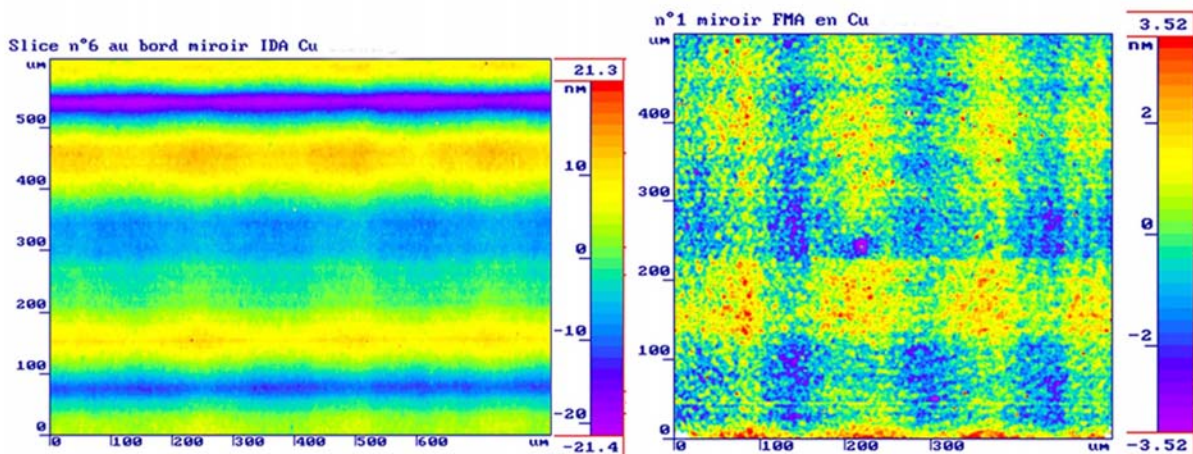
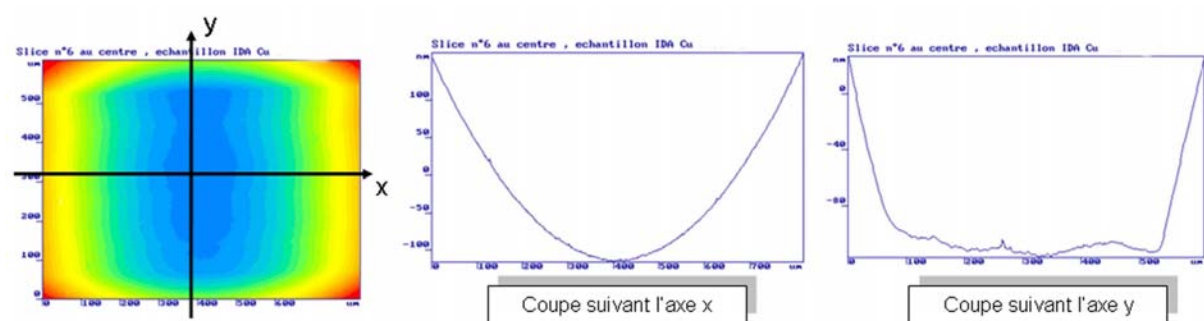
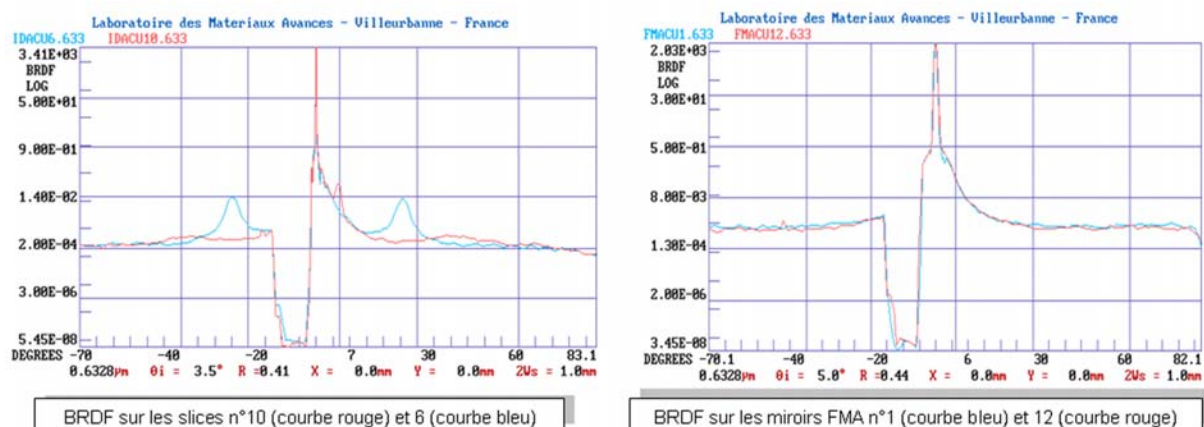


Figure 5- 12 : Rugosité du prototype de la société D. A gauche : Rugosigramme de la slice n°6. A droite : Rugosigramme du miroir FMA n°1



| | | SOCIETE B | SOCIETE C | SOCIETE D | SPECIFICATIONS |
|-----------------------|------------------|---------------|---------------|------------------------------|----------------|
| STRAY LIGTH (%) | SLICE 6 | 6.2 | 0.48 | 0.33 | < 1 |
| | SLICE 8 | 4.1 | 0.42 | 0.26 | |
| | FMA 1 | 2.72 | 0.18 | 0.63 | |
| | FMA 12 | 3 | 0.15 | 0.57 | |
| ROUGHNESS (nm RMS) | SLICE 6 (CENTRE) | 14.8 | 1.63 | 7.1 | < 5 |
| | SLICE 6 (BORD) | 8.9 | 2.84 | 7.1 | |
| | SLICE 5 | | 1.67 | | |
| | SLICE 10 | | | 6.7 | |
| | FMA 1 | 9.1 | 2.94 | 1.17 | |
| | FMA 12 | 7.8 | 2.68 | 1.37 | |
| CURVATURE RADIUS (mm) | RX SLICE 6 | 298.7 +/- 8.7 | 310.8 +/- 0.7 | 302 (centre) 312.4 (bord) | 300 +/- 0.5 |
| | RY SLICE 6 | 184.9 +/- 4.1 | 311.2 +/- 2.9 | Non Sphérique | |
| | RX SLICE 5 | | 310.6 | | |
| | RY SLICE 5 | | 285.2 | | |
| | RX SLICE 10 | | | 306.7 | |
| | RY SLICE 10 | | | Non Sphérique | |
| | RX-RY FMA 1 | 22.2 | 22.53 | 22.59 | |
| | RX-RY FMA 12 | 22.59 | 22.52 | 22.69 | 22.5 +/- 0.03 |

Tableau 5- 2 : Tableau résumant les mesures de lumière diffusée, de rugosité et de forme, effectuées par le LMA, des IDA et FMA des trois fournisseurs

3.5 Conclusion

Les trois fournisseurs sélectionnés pour la fabrication du prototype du découpeur d'images pour la Phase de Design Préliminaire, ont proposé trois solutions techniques basées sur des technologies de fabrication très différentes. Les principales caractéristiques de fabrication de chaque fournisseur sont résumées dans le Tableau 5- 3. Les tests individuels – Rugosité, BRDF, Profil de forme – réalisés au LMA, montrent que les trois prototypes présentent tous des mesures hors spécification (Tableau 5- 2). Le prototype de la société C est le plus proche des spécifications demandées en terme de fabrication.

| Fabricant | Composant | Matériau | Procédé de fabrication | Production | Assemblage | Post-polishing |
|-----------|-----------|------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------------|----------------|
| SOCIETE B | IDA | Aluminium | Fly Cutting | Individuel | Trous et tiges dans les slices | Non |
| | FMA | | | Monolithique | Sans | |
| SOCIETE C | IDA | Invar avec Nickel phosphoré | Diamond Turning | Individuel | Trous et tiges dans les slices | Oui |
| | FMA | Fortal avec Nickel phosphoré | | | Trous et tiges dans les FMA | Non |
| SOCIETE D | IDA | Cuivre | Fly Cutting | Monolithique | Sans | Non |
| | FMA | | | | | |

Tableau 5- 3 : Résumé des caractéristiques de fabrication et d'assemblage des trois prototypes

4 Assemblage

Les méthodes d'assemblage sont différentes pour les trois prototypes. Elles apportent leurs avantages et inconvénients. La mesure d'alignement des slices les unes par rapport aux autres a été effectué par LMA à l'aide du banc de mesure de BRDF. La précision de mesure est de 3.6 secondes d'arc. Les angles des miroirs du FMA n'ont pas pu être contrôlés à l'aide du banc de BRDF à cause du rayon de courbure trop petit des miroirs secondaires, car le faisceau optique diverge rapidement en sortie.

4.1 Assemblage et contrôles du prototype de la société B

Les slices du prototype de la société B sont assemblées à l'aide de trois tiges. La tige centrale sert de guide pour l'empilage, tandis que les deux tiges latérales sont des vis qui viennent serrer l'IDA entre deux cales. D'après les mesures effectuées au LMA, seules trois slices sur douze sont conformes à leurs spécifications angulaires (Figure 5- 18). L'erreur angulaire maximale atteint 25.5 minutes d'arc ce qui correspond à l'inversion des slices n°5 et 8 lors de l'assemblage. Etant donné que le FMA est monolithique, aucun assemblage n'a été effectué (Figure 5- 15).

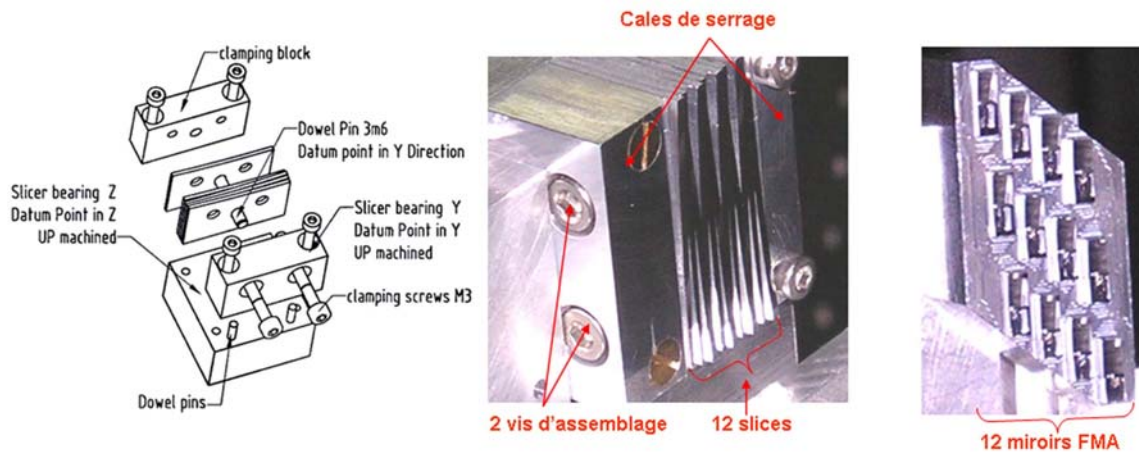


Figure 5- 15 : Prototype de la société B. De gauche à droite : Dessin mécanique de l'assemblage de l'IDA, vues de l'IDA et du FMA

4.2 Assemblage et contrôles du prototype de la société C

Pour le prototype de la société C, l'IDA est également serré entre deux cales. Les deux trous utilisés pour l'assemblage accueillent des vis avec des écrous afin de bloquer l'IDA en position. A la suite d'un premier assemblage et d'un examen à la binoculaire, les slices n°6 et 12 présentaient un dépôt de Nickel irrégulier sur leur surface. Ces deux slices ont été refabriquées puis réassemblées avec les autres. Mais, étant donné qu'elles n'ont pas été fabriquées en même temps que les autres, ces deux slices risquent de présenter des caractéristiques optiques et géométriques différentes. De plus, les slices ont été serrées et desserrées plusieurs fois. Le rayon de courbure des slices a été mesuré par LMA à 310 mm alors que de la société C l'avait contrôlé à 300 mm avant l'assemblage. Ceci indique une déformation des slices lors de l'assemblage (les slices se comportent comme des ressorts). C'est pour cette raison que toutes les slices ne sont pas parfaitement jointives (Figure 5- 16, au milieu). La société C a supposé qu'un hasberg de 1.5 mm pourrait corriger le problème. Les mesures montrent que quatre slices sont conformes à leurs spécifications angulaires autour de l'axe y (Figure 5- 18).

La même technique a été employée avec les miroirs secondaires. Leurs alignements ont été ajustés à l'aide d'une lunette autocollimatrice de grande ouverture. Ensuite, les miroirs ont été collés afin de conserver l'alignement (Figure 5- 16, à droite).

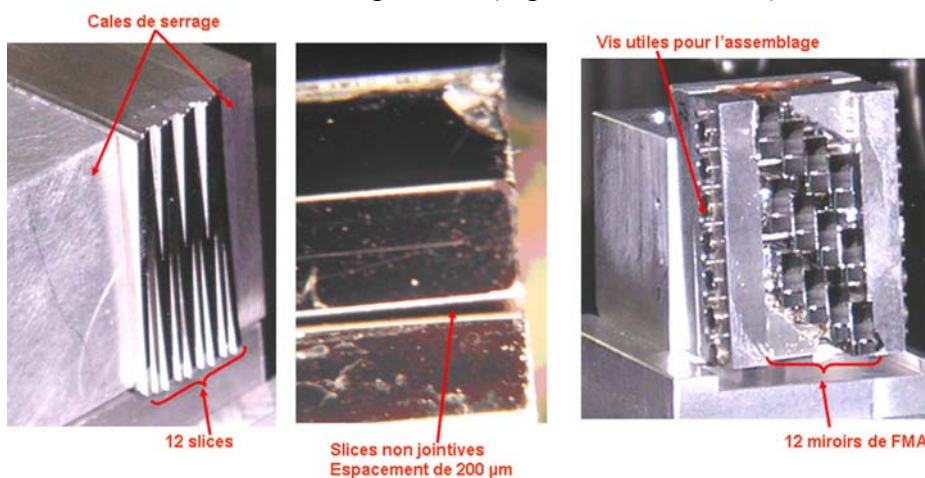


Figure 5- 16 : Prototype de la société C. De gauche à droite : l'IDA, une visualisation des slices non jointives et le FMA

4.3 Assemblage et contrôles du prototype de la société D

Aucun assemblage n'a été effectué sur l'IDA et le FMA du prototype de la société D, puisque ceux-ci sont monolithiques (Figure 5- 17). Sur la Figure 5- 18, on constate que cinq slices présentent une erreur angulaire légèrement supérieure à la spécification. L'erreur maximale atteint 50 secondes d'arc pour la slice n°12. De nombreux copeaux peuvent être observés visuellement, tout au long du bord des slices. Ceci est lié au fait qu'il est impossible de repolir les slices après usinage.

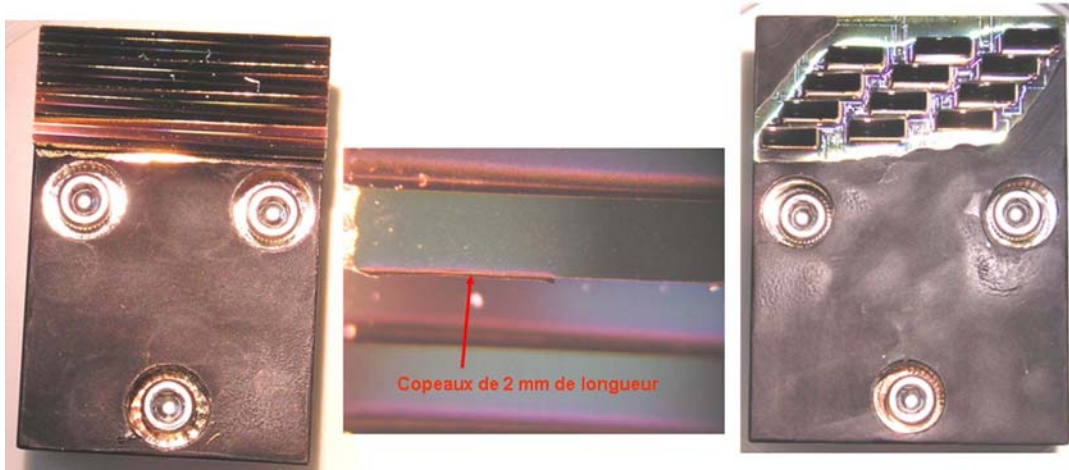


Figure 5- 17 : Prototype de la société D. De gauche à droite : l'IDA, une visualisation des copeaux sur les slices et le FMA

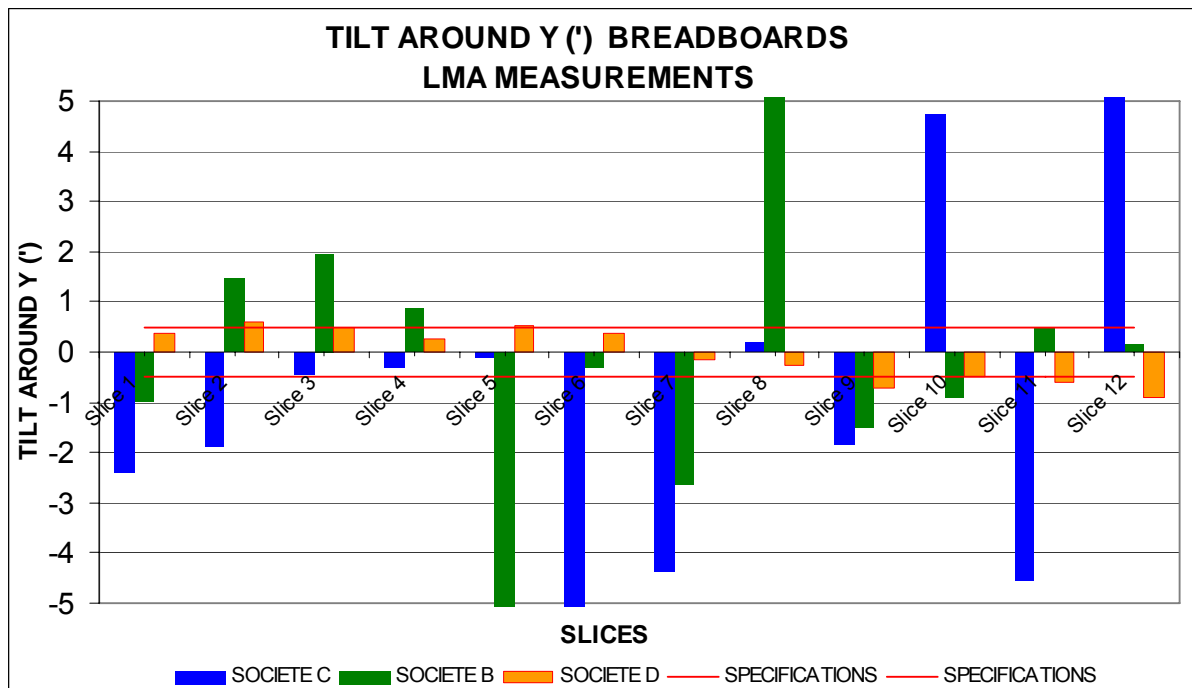


Figure 5- 18 : Erreurs angulaires autour de l'axe y des slices de IDA pour les trois prototypes

4.4 Conclusion

Les résultats des tests d'alignement des slices réalisés par LMA montrent que les deux prototypes des sociétés B et C, présentant de fortes erreurs d'alignement, ne sont pas en accord avec les spécifications d'angles demandées. Les erreurs angulaires sur ces deux prototypes sont telles que certaines images de pupille formées par l'IDA sont vignettées par leurs miroirs secondaires. En revanche, l'alignement de l'IDA du prototype monolithique de la société D, est en adéquation avec les spécifications, présentant une solution acceptable pour l'instrument MUSE, ce qui la place en position de favori pour la fabrication en série des IFUs de MUSE.

5 Liste des tests

Les tests individuels effectués au LMA ont permis de mieux connaître les trois prototypes découpeurs d'images. Aucun d'entre eux ne répond complètement aux spécifications. Les uns après les autres, les trois prototypes ont alors été installés sur le banc optique du CRAL, afin de visualiser les plans intermédiaires pour confronter les résultats aux critères de succès fixés dans le Tableau 5- 4. La description des tests et des modules d'éclairement et de détection utilisés est détaillée dans le plan de test [8].

Chaque IDA et FMA de chaque prototype possède la même interface mécanique permettant ainsi l'interchangeabilité des composants sur le banc optique, avec néanmoins un léger réalignement. Par manque de temps et pour des questions de coût, aucune surface de référence sur l'IDA ou le FMA n'a été demandée aux fournisseurs. De ce fait, la procédure d'alignement s'est révélée très délicate à réaliser. Pour ce faire, des miroirs plans de référence ont dû être placés sur l'IDA et le FMA à l'aide d'un microscope, afin de matérialiser leurs axes optiques avec un laser. De plus, vu la compacité de ce système optique, les plans intermédiaires sont difficilement accessibles, obligeant le module de détection à être équipé d'une optique de relais à grande ouverture et placé loin derrière le miroir découpeur (environ à 200 mm), où le faisceau utile devient très divergent – nombre d'ouverture de sortie de l'ordre de $F/4$. Vu la configuration du banc de tests, le module d'éclairement se trouve dans l'alignement du module de détection, créant ainsi des images parasites et de la lumière directe sur le détecteur. En résumé, la mise en place de ces tests de découpeurs d'images est plus complexe que celle de la Phase A.

| SPECIFICATIONS | | PLAN DE MESURE | | |
|--|--|--|--|---|
| | | Plan des pupilles intermédiaires | Plan de la pseudo fente | Plan de la pupille de sortie |
| Positionnement des pupilles intermédiaires | Positions des pupilles intermédiaires | Valeurs individuelles Précision de $\pm 43 \mu\text{m}$ suivant l'axe x $\pm 86 \mu\text{m}$ suivant l'axe y | | |
| | Angles θ_x et θ_y des slices | Valeurs individuelles $\pm 30''$ autour de l'axe y $\pm 1'$ autour de l'axe x | | |
| Grandissement du système | | | 0.075 ± 0.001 | |
| Dimensions des mini fentes | | | Longueur suivant l'axe x = $2.16 \pm 0.03 \text{ mm}$ Largeur suivant l'axe y = $75 \pm 2 \mu\text{m}$ | |
| Qualité Image (PSF) | | | 85 % d'énergie contenue dans un rectangle de $35 \times 70 \mu\text{m}$ | |
| Positionnement des mini fentes | Positionnement des mini fentes | | Distance entre deux centroïdes consécutifs: Valeurs individuelles $\pm 13 \mu\text{m}$ suivant l'axe x $\pm 33 \mu\text{m}$ suivant l'axe y | |
| | Ecart entre chaque mini fente | | $209 \pm 69 \mu\text{m}$ suivant l'axe x | |
| Dimensionnement de la pupille de sortie | | | | $4.05 \leq \text{f/D} \leq 4.5$ suivant l'axe x $8.1 \leq \text{f/D} \leq 9$ suivant l'axe y |

Tableau 5- 4 : Liste des tests sur banc optique des prototypes métalliques MUSE

6 Résultats et comparaisons

Ce paragraphe donne les résultats des tests effectués au CRAL sur les trois prototypes du RIS. Suivant le niveau de spécifications atteint par l'IDA ou le FMA, les tests ont été plus ou moins développés. Puisque les éléments du RIS sont réfléchitifs, toutes les acquisitions ont été effectuées à 577 nm. Elles sont corrigées du chromatisme axial et latéral du module de détection et des erreurs du détecteur CCD. Les résultats sont extraits en partie du rapport de tests [9].

6.1 Prototypes des sociétés B et C

Les prototypes des sociétés B et C présentent tous les deux des erreurs angulaires importantes sur leurs slices autour de l'axe y, données par les mesures du LMA (Figure 5- 18). Toutefois, chaque IDA a été installé sur le banc optique afin de visualiser le plan des pupilles intermédiaires. Ce plan permet en effet de connaître les erreurs angulaires autour des axes x et y. La Figure 5- 19 présente le plan des pupilles intermédiaires pour les prototypes des sociétés B et C. Pour la société B, on remarque que les slices n°5 et 8 sont inversées. De plus, les slices sont plus ou moins déformées, créant un élargissement des pupilles intermédiaires suivant l'axe y. Le rayon de courbure de toutes les slices n'est pas identique car les images des pupilles intermédiaires sont plus défocalisées (les unes par rapport aux autres) que sur le design optique théorique. De par cette mauvaise focalisation et leurs erreurs angulaires importantes, certaines pupilles intermédiaires ne correspondent pas à leurs miroirs sur le FMA. De ce fait, aucune visualisation de la pseudo fente, ni quantification de qualité image n'a pu être effectuée. Quant aux pupilles intermédiaires du prototype de la société C, elles sont décalées suivant les deux axes x et y. Le décalage suivant l'axe x est dû aux mauvais positionnements des slices dans leur outil d'assemblage mécanique, et celui suivant l'axe y au phénomène de ressort des slices lors du serrage de la pile. En revanche, par rapport au prototype de la société B, les slices sont moins déformées, à part les slices n°6 et 12 qui correspondent aux slices désassemblées (§ 4.2). Ce désalignement est tel que la suite des tests n'est pas réalisable, puisqu'une slice éclaire plusieurs miroirs du FMA, créant ainsi des fentes multiples dans le plan de la pseudo fente. De plus, étant donné l'élargissement des pupilles suivant l'axe y et une large défocalisation, la mesure du centroïde de chaque pupille n'est pas fiable, rendant impossible la comparaison des mesures angulaires des slices mesurées au LMA avec celles effectuées dans le plan des pupilles intermédiaires.

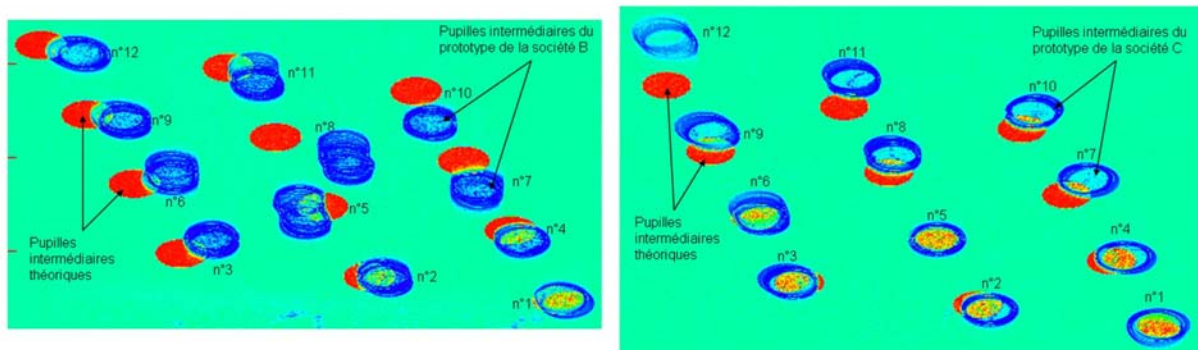


Figure 5- 19 : Superposition des plans des pupilles intermédiaires mesurées au laboratoire et données par Zemax. A gauche : Prototype de la société B. A droite : Prototype de la société C

6.2 Prototype de la société D

Suite aux deux échecs précédents qui ont empêché la détermination de qualité image et de caractéristiques de la pseudo fente, le prototype de la société D est installé sur le banc optique.

6.2.1 Plan des pupilles intermédiaires

Le but de ce test est de mesurer les positions relatives des images de la pupille du télescope dans le plan des pupilles intermédiaires situé à 150 mm du miroir découpeur, dont la pupille n°5 constituera la référence en terme de meilleur foyer. Les douze images de la pupille du télescope sont enregistrées simultanément sur le détecteur CCD (Figure 5- 20). En superposant le plan des pupilles intermédiaires calculé par Zemax avec celui mesuré au laboratoire (Figure 5- 21), on constate qu'en première approximation les angles des slices sont proches des spécifications, ce qui avait été mesuré par le LMA. A partir des données brutes, il est difficile de calculer précisément le centroïde de chaque pupille puisque l'incertitude de mesure dépasse la spécification de $\pm 43 \mu\text{m}$. Cette incertitude élevée est due à l'élargissement des pupilles suivant l'axe de dispersion donné par le profil de forme des slices illustré par la Figure 5- 14. Pour la mesure des angles des slices, on se contentera donc de la mesure du LMA.

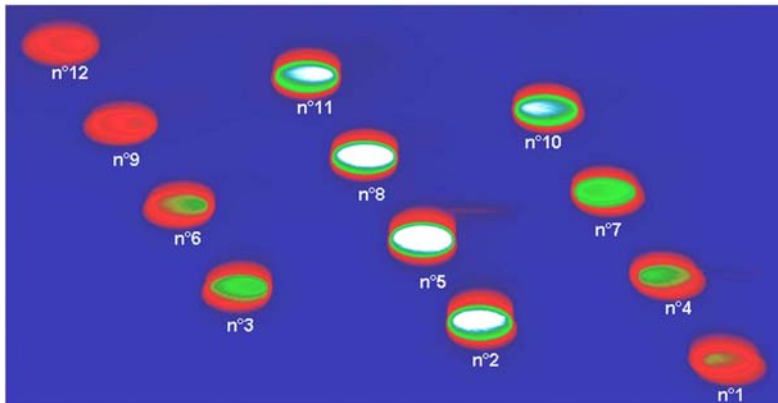


Figure 5- 20 : Images brutes en fausses couleurs du plan des pupilles intermédiaires

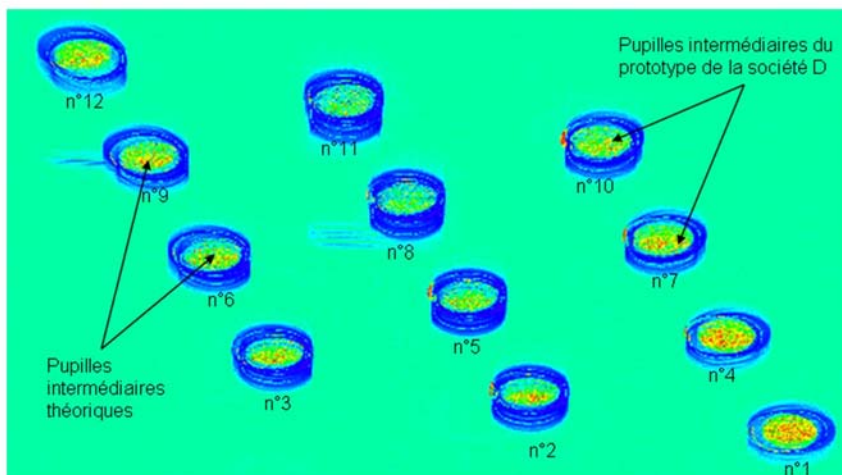


Figure 5- 21 : Superposition des plans des pupilles intermédiaires mesurées au laboratoire et données par Zemax pour le prototype de la société D

En analysant, la pupille intermédiaire n°5, la FWHM mesurée au laboratoire suivant l'axe x est proche de celle modélisée à l'aide de l'outil présenté au Chapitre 2 (2.4 mm mesurés pour 2.5 mm calculés). En revanche, suivant l'axe y, bien que les FWHM simulée et mesurée

soient proches (1.25 mm contre 1.32 mm), la pupille est très élargie entraînant une perte d'éclairement de l'ordre de 2 % hors du miroir n°5 du FMA. Les profils de forme de cette pupille intermédiaire sont présentés sur la Figure 5- 22. Etant donné que les angles des slices sont corrects et que la quasi-totalité du flux contenu dans la pupille intermédiaire est reçue par son miroir de FMA, ces derniers sont installés et alignés sur le banc optique afin de caractériser le plan de la pseudo fente.

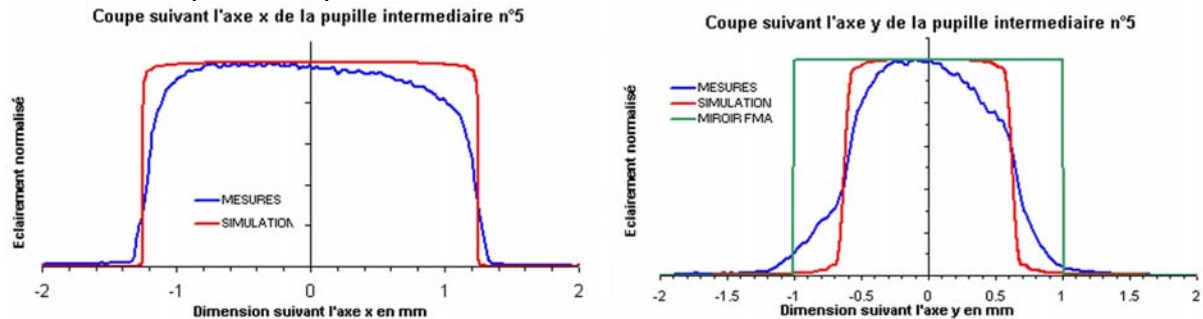


Figure 5- 22 : Coupe de la pupille intermédiaire n°5. A gauche : suivant l'axe x. A droite : suivant l'axe y

6.2.2 Plan de la pseudo-fente

Le plan de la pseudo fente permet de mesurer les caractéristiques suivantes :

- Alignement des mini fentes entre elles, avec l'étude du chevauchement de celles-ci,
- Géométries des mini fentes,
- Qualité image par mesure de PSF.

6.2.2.1 Alignement et caractéristiques de la pseudo fente

A l'aide de l'acquisition présentée sur la Figure 5- 23, le positionnement relatif ainsi que le chevauchement éventuel des mini fentes peuvent être déterminés. Sur la Figure 5- 24, le positionnement des centroïdes de chaque mini fente est conforme aux spécifications de $\pm 33 \mu\text{m}$ suivant l'axe y. Le positionnement suivant l'axe x est conforme pour 8 miroirs du FMA (spécification de $\pm 13 \mu\text{m}$). L'erreur maximale mesurée atteint seulement $26 \mu\text{m}$ pour le miroir n°10. De plus, aucun chevauchement des mini fentes n'est détecté. L'espace libre entre chaque fente est conforme à sa spécification de $245 \pm 26 \mu\text{m}$. Globalement, en combinant la mesure d'angles des miroirs du FMA, qui sont très proches de la spécification et le non chevauchement des mini fentes, on peut considérer que les miroirs du FMA sont acceptables pour le prototype et l'instrument MUSE.

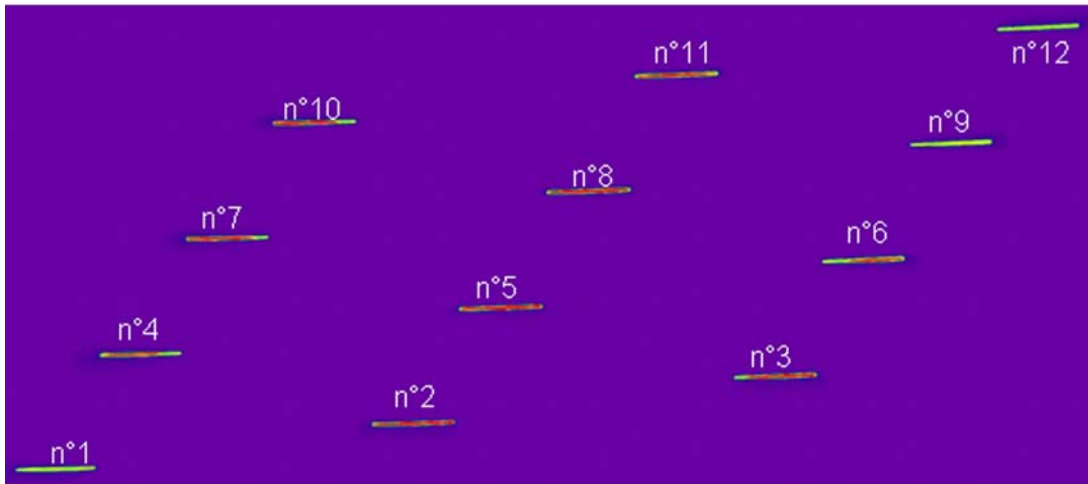


Figure 5- 23 : Image brute dans le plan de la pseudo fente

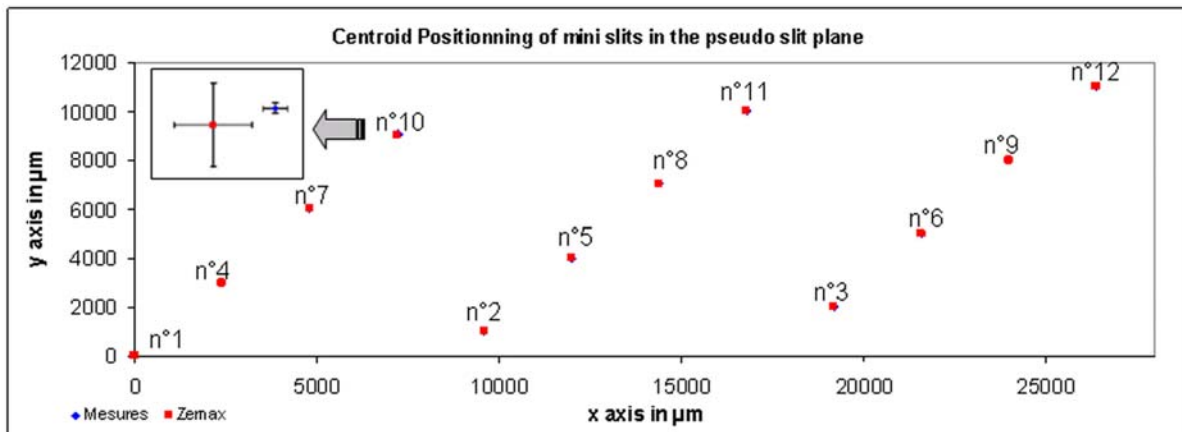


Figure 5- 24 : Positionnement des centroïdes de chaque mini fente dans le plan de la pseudo fente

En modifiant le module de détection afin d'acquérir une seule mini fente sur le détecteur, on calcule sa géométrie. En calculant la longueur de chaque mini fente, le grandissement du système découpeur d'images est conforme à la spécification de 0.075 ± 0.01 , ce qui montre que tous les miroirs du FMA ont le même rayon de courbure. Sur chacune des mini fentes, on constate des zones s'étendant au maximum sur un quart de la mini fente, plus ou moins sombres, représentant une baisse d'éclairement de 20 à 30 %. En reconstituant le découpeur d'images, on remarque que les zones les plus sombres sont associées aux slices les plus inclinées (Figure 5- 25). Le calcul d'ombre réalisé au Chapitre 2 montre une perte d'éclairement de l'ordre de 1.55 % sur l'ensemble du découpeur d'images. Ceci n'explique donc pas la perte d'éclairement plus prononcée, visualisée sur le banc optique. Au moyen d'une inspection visuelle plus poussée, on remarque une absence de coating sur certaines régions des slices, ce qui peut expliquer la perte de lumière.

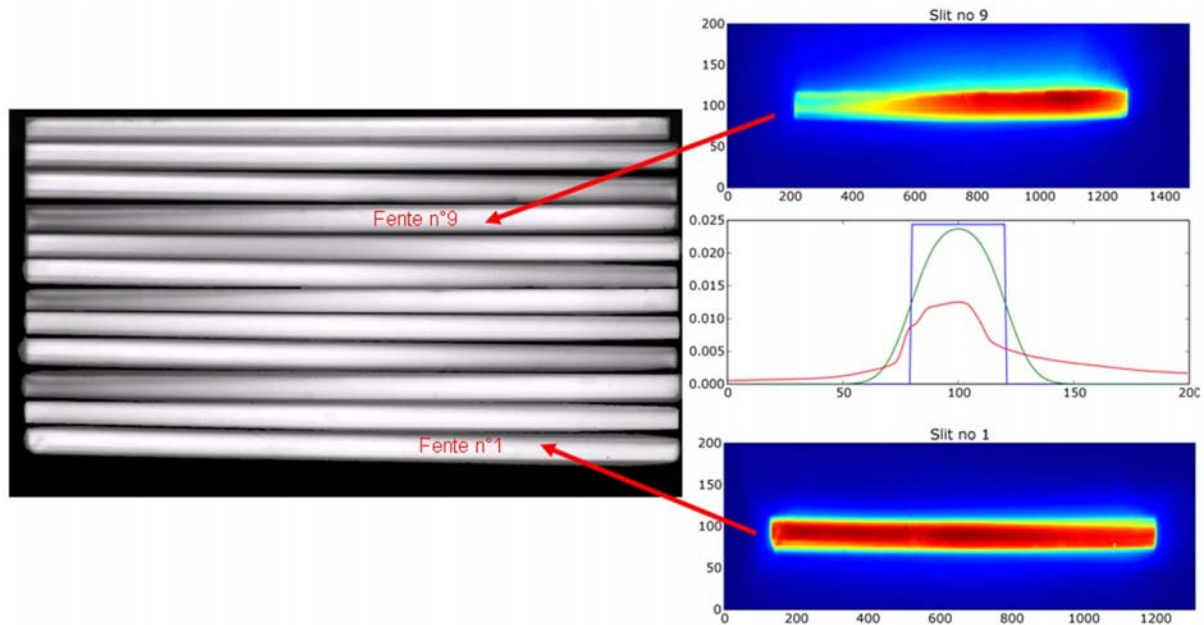


Figure 5- 25 : Visualisation des fentes. A gauche : Découpeur d'images reconstitué. A droite : Slice n°1 et 9

De plus, un halo lumineux asymétrique entoure chaque mini fente. Près de 50% de l'énergie est concentrée dans ce halo. Cette lumière diffusée provient de l'élargissement de la pupille intermédiaire qui déborde des miroirs secondaires du FMA. Cette perte conséquente de lumière peut être due à des défauts de bord des miroirs du FMA ou à leurs états de surface eux mêmes, qui diffuseraient.

6.2.2.2 Qualité image

Dans le plan de la pseudo fente, la qualité image du RIS est étudiée grâce à l'analyse de la PSF. Un trou de 10 μm de diamètre est installé dans le plan focal du télescope et imagé par le système découpeur d'images dans le plan de la pseudo fente. Le module de détection réimage la PSF sur la caméra CCD avec un grandissement de l'ordre de 5. Pour atteindre un rapport signal sur bruit de 50, le temps de pose est de 300 secondes. Sept PSF sont simultanément enregistrées sur le détecteur CCD. La Figure 5- 26 représente la PSF obtenue par la conjugaison de la slice n°5 et de son miroir secondaire, où la spécification de 85% d'énergie dans une aire de $35 \times 70 \mu\text{m}$ de coté est représentée par le rectangle rouge. Cette PSF est quasi de symétrie circulaire alors qu'elle devrait être elliptique comme le montrent les coupes de PSF suivant les axes x et y (Figure 5- 26).

La FWHM de la PSF mesurée est de l'ordre de 8 μm suivant les deux axes tandis que celle donnée par Zemax est de $2.5 \times 5.5 \mu\text{m}$. Une défocalisation de 50 μm dans le plan de la pseudo fente ou une moindre qualité image des miroirs de FMA expliqueraient cette circularité. La mesure d'énergie dans un rectangle n'est pas calculée au vu de la difficulté du soustraction du fond du soit à un mauvais bafflage ou soit à une diffusion des éléments optiques.

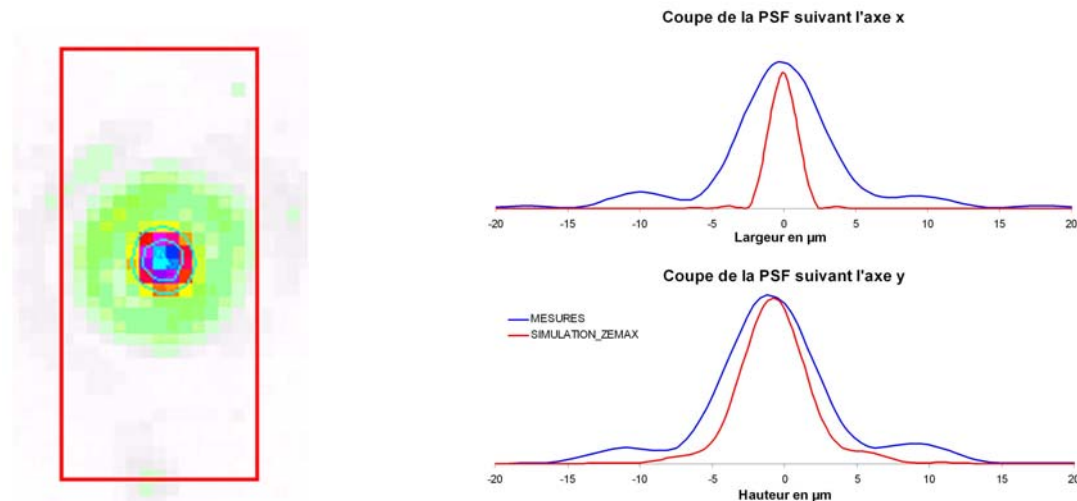


Figure 5- 26 : PSF du RIS. A gauche : PSF brute à 577 nm. A droite : Coupe suivant les axes x et y

6.2.3 Plan de la pupille de sortie

La mesure des dimensions de la pupille de sortie nous renseigne sur le nombre d'ouverture de sortie du RIS. Cette mesure consiste en une superposition de fragments d'images de la pupille de sortie puisque, pour des questions d'encombrement mécanique, la détection est placée à 200 mm du FMA. L'objectif de la détection ($f=85$ mm, $f/D=1.2$) vignette légèrement. Au premier ordre, on retrouve l'élargissement de la pupille suivant l'axe y donné par le profil de forme des slices. Suivant l'axe x, le nombre d'ouverture de sortie est de l'ordre de 4, conforme aux spécifications. Elle est quasi identique suivant l'axe y, le rendant deux fois supérieurs à la spécification.

7 Conclusion

Ce chapitre propose une alternative au découpeur d'images en technologie « verre ». Partant d'un design optique à deux matrices de miroirs (IDA et FMA) le rendant très compact, il semble plus adapté à une fabrication utilisant les machines d'usinage diamant. Trois prototypes ont été fabriqués chez les industriels B, C et D. Chaque fournisseur a choisi la solution qui lui semblait la plus appropriée pour satisfaire les spécifications du RIS. Alliant différents matériaux (aluminium, invar ou cuivre), procédé de fabrication (fly cutting ou diamond turning) et méthode d'assemblage (monolithique ou fabrication individuelle), ces trois prototypes ont été testés individuellement au LMA qui a réalisé des mesures de rugosité, de BRDF, de profil de forme et d'angles des slices. Suite à cette dernière mesure, les prototypes des sociétés B et C, utilisant la méthode d'assemblage par fabrication individuelle, présentent des erreurs angulaires dix fois supérieures aux spécifications, ne permettant pas la qualification du prototype sur le banc optique du CRAL puisque certaines pupilles intermédiaires ne correspondent pas à leur miroir sur le FMA. En dépit de ces erreurs angulaires, les mesures de rugosité et de profil de forme du prototype de la société C sont supérieures aux deux autres. Un effort particulier leur a été demandé afin de corriger ces erreurs d'assemblage. Il semble que pour assurer les angles de chaque miroir, la technologie d'usinage monolithique utilisée par la société D est la plus adéquate. En effet, ce dernier prototype a pu être installé sur le banc optique du CRAL afin de réaliser la série de tests nécessaire à la qualification d'un découpeur d'images. Les plans des pupilles intermédiaires et de sortie ont révélé un élargissement de l'ordre de 50 % des dimensions de la pupille suivant

l'axe y du au profil de forme non sphérique des slices suivant leur largeur. Malgré cet élargissement, la quasi-totalité du flux est captée par les miroirs FMA. En revanche, le nombre d'ouverture de sortie suivant l'axe y passe de 8 à 4, obligeant à une modification éventuelle du design du spectrographe, difficilement réalisable à cause de son ouverture de sortie de 1.96. Dans le plan de la pseudo fente, la visualisation des mini-fentes nous a permis de remarquer un problème de coating sur la surface des slices puisque leurs images ne sont pas éclairées uniformément. En effet, les zones les plus sombres sur les mini fentes correspondent aux slices les plus inclinées. De plus, un halo asymétrique est présent autour de celles-ci, concentrant près de 50 % du flux lumineux et probablement lié à l'élargissement de la pupille intermédiaire. La qualité image a été mesurée. Les PSF sont anormalement circulaires et leur FWHM suivant l'axe y sont de l'ordre de la PSF modélisée, montrant une certaine concentration d'énergie dans un rectangle de $35 \times 70 \mu\text{m}$. Ces non conformités, qui pour certaines d'entre elles peuvent être corrigées par design, ont été discutées avec le constructeur. Afin d'améliorer son procédé de fabrication et de valider les découpeurs d'images en technologie « métal », une autre pile de slices leur a été demandée pour qualifier le profil de forme et le coating des slices.

En conclusion, les découpeurs d'images en technologie « métal » présentent des non conformités. Néanmoins, ces premiers prototypes montrent des signes encourageants pour l'avenir. En effet, partis d'aucun a priori, nous avons été capable de diagnostiquer les points durs liés à la fabrication d'optiques en usinage diamant. Une discussion avec les fabricants devrait permettre d'améliorer leurs procédés afin que ces découpeurs d'images métalliques soient installés dans l'instrument MUSE, ce qui constituerait une première, puisque ces composants sont très rarement employés dans le domaine de longueur d'onde visible.

Références

1. Kosmalski, J., 2005, "Reflective Image Slicer components – Statements of Work and requirements", n° MUSE-MEM-TEC-064
2. Todd, S., 2003, "Cryogenic image slicing IFU for UKIRT: manufacture, alignment, laboratory testing, and data reduction", SPIE 4842, 151
3. Lee et al., 2004, "Image slicers: design for manufacturability", Proc. SPIE 5494, 176
4. Dubbeldam et al., 2004, "Freeform diamond machining of complex monolithic metal optics for integral field systems, SPIE, 5494, 163
5. Ren, D., Ge, J., 2004, "An Image Slicer Integral Field Unit with Diffraction-limited Performance for Three-Dimensional Imaging Spectroscopy", PASP, 116, 46
6. Glenn et al., 2004, "Design, fabrication, assembly, and testing of the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics (FISICA) integral field unit", SPIE 5492, 1254
7. Preuss, W., 2005, "Precision Machining of Integral Field Units", Elsevier (in prep)
8. Laurent, F., « MUSE Reflective Image slicer breadboard test plan », n° VLT-TRE-MUS-14670-0067
9. Renault, E., « MUSE Reflective Image slicer breadboard Test report », n° VLT-TRE-MUS-14670-0137

CHAPITRE 6

COMPARAISON DES TECHNOLOGIES « VERRE » ET « METAL »

CHAPITRE 6

COMPARAISON DES TECHNOLOGIES

« VERRE » ET « METAL »

1 Introduction

Dans la communauté astronomique, les spectrographes intégraux de champ ont pris place dans de nombreux projets depuis cette dernière décennie. Ceci provient du fait qu'ils permettent d'obtenir simultanément le spectre d'un ou plusieurs objets étendus en une seule pose. Parmi les différents types de spectrographes intégraux de champ, le dernier né est le système découpeur d'images, qui a l'avantage de fournir une grande compacité des spectres sur le détecteur CCD avec un nombre de pixels spectraux élevé. Les systèmes découpeurs d'images avec des miroirs sphériques se déclinent en plusieurs designs optiques permettant de répondre aux spécifications de haut niveau d'un instrument. Ce chapitre les résume et les compare. De plus, au cours de cette étude, plusieurs approches ont été choisies pour la fabrication et l'assemblage des miroirs découpeurs sphériques. En effet, les chapitres précédents ont montré qu'il existe deux grandes technologies de fabrication des miroirs découpeurs appliquées aux instrumentations du JWST et du VLT :

- Polissage classique des slices individuelles, en Zérodur ou un autre verre, et avec un assemblage par adhésion moléculaire – Chapitre 3 et 4,
- Usinage diamant des slices en métal, soient individuels ou par bloc – Chapitre 5.

Ce chapitre a pour but de mettre en parallèle les deux technologies de fabrication « verre » et « métal », en se basant sur des critères d'évaluation de fabrication, d'assemblage, de performances optiques et de management, afin de mieux connaître les points forts/faibles et les domaines d'applications privilégiés.

2 Mise en parallèle des deux technologies

Un nombre important de critères d'évaluation ont été pris en compte dans cette comparaison et sont explicités dans ce paragraphe.

2.1 Critères d'évaluation concernant la fabrication et l'assemblage

- Rugosité : C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface optique à caractère nano graphique. Dans les optiques astronomiques, elle a une incidence directe sur la valeur de lumière diffusée exprimée à l'aide du $TIS = (4\pi\sigma/\lambda)^2$ où σ est la rugosité en nanomètre et λ la longueur d'onde.
- Rayon de courbure : C'est le rayon de courbure mesuré de la surface optique de chaque élément.
- Qualité de surface : C'est l'écart mesuré sur chaque miroir à la sphère idéale spécifiée.
- Erreurs angulaires : Ce sont les erreurs de positionnement mesurées sur le centre de courbure des éléments optiques, exprimées en μm ou en secondes d'arc.
- Matériau : C'est le matériau dans lequel les optiques sont fabriquées.
- Dilation thermique du matériau : C'est le coefficient de dilation thermique (CTE) des matériaux.

- « Sharp edge » : C'est la perpendicularité des bords de chaque slice.
- Ecailles: Ce sont les défauts micrométriques visualisés sur la surface optique.
- Rayures : Ce sont les rayures dues aux traces de l'outil de polissage visualisées sur la surface optique.
- Méthode d'assemblage : C'est la méthode d'assemblage de la pile de slices et des autres optiques.
- Outil d'assemblage : C'est l'outil ou la machine nécessaire à l'assemblage de la pile de slices.
- Planéité des surfaces d'assemblage : C'est la spécification de planéité et de parallélisme des surfaces en contact lors d'un assemblage optique.
- Surface de référence : C'est le nombre et la localisation des surfaces de référence sur les éléments optiques.
- Encombrement du système : C'est le volume du système découpeur d'images (longueur×largeur×hauteur).

2.2 Critères d'évaluation concernant les performances optiques

- Tests dans le plan des pupilles intermédiaires : C'est le résultat des tests dans le plan des pupilles intermédiaires concernant le positionnement des centroïdes et la forme des pupilles intermédiaires.
- Tests dans le plan de la pseudo fente : C'est le résultat du test dans le plan de la pseudo fente en terme de positionnement des centroïdes des mini fentes, de possibles chevauchements et de qualification du grandissement du système.
- Tests de qualité image du système : C'est la mesure de PSF du système découpeur d'images dans le plan de la pseudo fente.
- Tests de pupille de sortie : C'est la détermination du nombre d'ouverture f/D de sortie du système.

2.3 Critères d'évaluation concernant le management

- Durée de R&D : Temps nécessaire aux discussions afin d'améliorer le système, de le prototyper et de le tester.
- Durée de fabrication : Temps nécessaire à la fabrication et l'assemblage des éléments individuels.
- Coût : Coût des éléments individuels.
- Difficulté d'intégration et d'alignement : Complexité de l'intégration et de l'alignement au vu des dimensions du système et des tolérances demandées.
- Durée des tests: Durée des tests en tenant compte des difficultés de mise en œuvre.
- Fiabilité : Risque d'erreur pour une production de masse.

2.4 Résumé des critères d'évaluation

Le Tableau 6- 1 reprend tous les critères d'évaluation présentés précédemment et mesurés au cours de cette étude pour les deux systèmes découpeurs d'images en verre et en métal. Pour le système découpeur d'images en verre, deux distinctions sont créées entre un concept tout réflectif – Prototypes CRAL et ESA – ou catadioptrique – Prototype MUSE. Concernant les découpeurs d'images en métal, on distinguera les miroirs découpeurs avec assemblage individuel – Prototypes des sociétés B et C – et en usinage monolithique – Prototype de la

société D. Dans le Tableau 6- 1, les cases jaunes correspondent aux spécifications données dans le cahier des charges et qui n'ont pas été mesurées. Les autres cases présentent les résultats des mesures.

| CRITERES D'EVALUATION | | SYSTEME DECOUPEUR D'IMAGES EN VERRE | | SYSTEME DECOUPEUR D'IMAGES EN METAL | |
|--|-----------------------------------|---|--|---|--|
| | | DECOUPEUR D'IMAGES TOUT REFLECTIF PROTOTYPES CRAL ET ESA – CYBERNETIX | DECOUPEUR D'IMAGES CATADIOPTRIQUE PROTOTYPE MUSE – CYBERNETIX | MIROIR DECOUPEUR AVEC ASSEMBLAGE INDIVIDUEL PROTOTYPE MUSE SOCIETES B ET C | MIROIR DECOUPEUR MONOLITHIQUE PROTOTYPE MUSE – SOCIETE D |
| FABRICATION ET ASSEMBLAGE | | | | | |
| Rugosité | | < 2.25 nm RMS | | De 1.5 à 7 nm RMS | De 1.5 à 15 nm RMS |
| Rayon de courbure | | Valeur spécifiée ± 0.25 mm Puis, Valeur spécifiée ± 0.1 mm | Valeur spécifiée ± 0.75 mm | Valeur spécifiée ± 10 mm Toroidale | |
| Qualité de surface optique | | < $\lambda/2$ PTV | | De $\lambda/2$ à 2λ | Non sphérique suivant l'axe de dispersion |
| Erreurs angulaires | | ≈ 1 minute d'arc Puis, 30 secondes d'arc | ≈ 9 secondes d'arc | 30 secondes d'arc à 8 minutes d'arc | ≈ 30 secondes d'arc |
| Matériau | | Zérodur | | Aluminium ou Invar | Cuivre |
| Dilatation thermique du matériau | | $0.01 \cdot 10^{-6}/K$ | | $23.5 \cdot 10^{-6}/K$ pour l'aluminium $2 \cdot 10^{-6}/K$ pour l'invar | $17 \cdot 10^{-6}/K$ pour le cuivre |
| "Sharp edge" | | <10 μm | | | <10 μm |
| Ecaillies | | Quelques unes à Aucune | Aucune | Aux extrémités des slices | Copeaux le long des slices |
| Rayures | | Peu | | Nombreuses | |
| Méthode d'assemblage | | Adhésion moléculaire | | Assemblage mécanique | Monolithique |
| Outil d'assemblage | | Du trièdre mécanique au trièdre optique | Trièdre optique | Avec deux ou trois tiges passant au centre des surfaces de contact | Sans |
| Planéité des surfaces d'assemblage | | < $\lambda/4$ PTV | | | |
| Surface de référence | | Oui (surface arrière et latérale) | | Non | |
| Encombrement du système | | Faible (150x100x10 mm) | Moyen (800x250x250 mm) | Faible (150x100x10 mm) | |
| PERFORMANCES OPTIQUES | | | | | |
| Tests pupilles intermédiaires | Positionnement des centroides | Partiellement conforme aux spécifications (10 slices sur 12) | | Non conforme aux spécifications | Partiellement conforme aux spécifications (7 slices sur 12) |
| | Forme des pupilles intermédiaires | Conforme aux spécifications | | Défocalisation | Elargies de l'ordre de 20 à 30 % suivant l'axe de dispersion |
| Tests dans le plan de la pseudo fente | Positionnement des centroides | Conforme aux spécifications | | | Partiellement conforme aux spécifications |
| | Chevauchement des fentes | Aucun | | | Aucun |
| | Grandissement | Conforme aux spécifications | | | Conforme aux spécifications |
| Tests de qualité image | Energie encadrée | Partiellement conforme aux spécifications (hors spécifications pour la conjugaison n°2) | | | A mesurer |
| Tests de pupille de sortie | f/D de sortie | Conforme aux spécifications à 436 et 577 nm Non mesuré à 823 nm | | | Non conforme aux spécifications suivant l'axe de dispersion |
| MANAGEMENT SUR LES PROTOTYPES REALISES | | | | | |
| Durée de R&D | | 4 ans | | | En cours depuis 1 an |
| Durée de fabrication | | 6 mois | | | 6 mois |
| Coût | | 60 k€ pour un système complet découpeur d'images | | | 40 k€ pour un système complet découpeur d'images |
| Difficulté d'intégration et d'alignement | | Assez long et peu difficile | | | Difficile et long du à l'absence de surfaces de référence |
| Durée des tests et de leur mise en œuvre | | De 4 mois à 1 an | 6 mois (tests polychromatiques) | | 6 mois du à la difficulté d'alignement et à l'encombrement mécanique |
| Fiabilité | | Elevée | | Elevée | Moyenne |

Tableau 6- 1 : Comparaison entre la technologie verre et métallique

3 Adaptabilité de chaque système et technologie aux différentes applications

On se propose d'orienter chaque technologie de fabrication appliquée aux systèmes découpeurs d'images vers les projets instrumentaux adéquats, en citant les avantages et les inconvénients de chacune. Dans un premier temps, on fournit un comparatif entre différents designs optiques de découpeurs d'images. Puis, on guidera chaque technologie de fabrication vers chaque instrument en fonction de ses spécifications de haut niveau.

Au cours de cette étude, trois designs différents de systèmes découpeurs d'images ont été présentés :

- Design tout réflectif avec trois matrices de miroirs – miroir découpeur, miroirs pupille et fente (Chapitre 3),
- Design catadioptrique associant un miroir découpeur avec des barrettes de mini lentilles et des lentilles de champ (Chapitre 4),
- Design tout réflectif avec deux matrices de miroirs (miroir découpeur et miroirs secondaires) (Chapitre 5).

Etant données les contraintes de masse et d'encombrement mécanique des instruments spatiaux ou sol, les systèmes découpeurs d'images tout réflectifs sont très compacts par rapport aux catadioptriques bien que ceux-ci puissent être repliés à l'aide d'un miroir plan. De plus, les temps de tests et de qualification des découpeurs d'images réflectifs sont moins longs car ils sont réalisés à une seule longueur d'onde. Néanmoins, l'avantage d'un système catadioptrique est que le nombre d'éléments optiques de type différent est réduit puisque les barrettes de mini lentilles sont identiques. De plus, il permet de supprimer les angles d'incidence dus aux miroirs, donc de réduire les aberrations afin de le rendre applicable à des instruments grand champ comme MUSE. Le désavantage des systèmes à trois miroirs est qu'ils incorporent des éléments optiques différents en terme de rayon de courbure et de tilts, ce qui augmente les coûts de fabrication. Dans ce sens, le système réflectif à deux miroirs est plus avantageux. En revanche, ce dernier présente l'inconvénient de multiplier les fonctions des miroirs secondaires agissant, à la fois sur la pupille de sortie et sur la pseudo fente rendant les plans intermédiaires peu accessibles.

Sur chaque miroir découpeur, en respectant les spécifications de haut niveau, la fabrication peut être optimisée en supprimant par exemple le tilt des slices autour de l'axe x, en choisissant des lots de rayon de courbure identique, ou en polissant toutes les slices en même temps sous la sphère de polissage afin de réduire les coûts de fabrication.

Dans ce mémoire de thèse, deux grandes technologies de fabrication ont été réalisées et testées :

- Technologie de polissage classique, sur du Zérodur, avec un assemblage à l'aide d'un trièdre optique,
- Technologie d'usinage diamant, sur du cuivre, sur une pièce monolithique.

Les systèmes découpeurs d'images fabriqués en Zérodur et en production individuelle de slices ont montré que les performances optiques demandées étaient atteintes, bien que celles-ci soient de l'ordre de la dizaine de secondes d'arc pour la précision sur l'angle des slices. Les bonnes performances optiques des systèmes découpeurs d'images en verre ont été obtenues au prix d'une Recherche et Développement active qui a duré près de quatre années en collaboration avec le CRAL, Cybernétix et le LAM. Un pas technologique a été franchi lors de la fabrication du miroir découpeur du prototype ESA, en validant le trièdre de qualité

optique servant à l'assemblage de la pile de slices par adhésion moléculaire. Un second pas technologique a définitivement validé les miroirs découpeurs en Zérodur, avec le prototype MUSE, puisque les caractéristiques géométriques et les spécifications de celui-ci étaient trois fois plus contraignantes que sur les deux autres prototypes déjà conçus. De plus, des tests à 50 K ont permis de valider le système optomécanique pour une instrumentation spatiale. Le seul inconvénient des systèmes découpeurs d'images en verre est le coût et le temps de fabrication. Bien qu'optimisée, celle-ci repose sur du polissage classique d'éléments individuels et sur un assemblage en classe propre basé sur la technique d'adhérence moléculaire. Le coût devient un facteur limitant pour une instrumentation multi IFUs comme MUSE, mais aussi pour les projets spatiaux comme JWST. En effet, suite à un appel d'offre européen, l'ESA vient de sélectionner la fabrication de l'IFU de NIRSpec basée sur la technologie d'usinage diamant sur des pièces monolithiques en aluminium.

Une alternative au coût et temps de fabrication excessifs est peut être l'utilisation des progrès de la technologie par usinage diamant sur des métaux. Trois prototypes ont été fabriqués et testés à l'Observatoire de Lyon pour l'instrumentation du VLT. La technologie basée sur une fabrication individuelle n'a pas permis d'atteindre les spécifications demandées (bien que le prototype de la société C présente des états de surface satisfaisants). La technologie choisie par la société D qui s'est orientée vers une fabrication monolithique des éléments a permis de valider l'alignement angulaire des miroirs. Ce prototype a révélé quelques non conformités, dont un profil de forme non sphérique des slices suivant la direction de dispersion, créant un élargissement de la pupille ainsi qu'une absence de coating liée à l'orientation des slices. Actuellement, des discussions avec les industriels concernés permettront d'améliorer leurs procédés afin de résoudre ces non-conformités. L'industrie de l'usinage diamant a fait des progrès puisqu'il y a cinq ans, la principale difficulté de réalisation des miroirs découpeurs en métal était la rugosité. Or celle-ci a été mesurée plusieurs fois inférieure à 5 nm RMS sur nos prototypes. De plus, peu de structures dues à la trace de l'outil sont présentes sur la surface optique. De ce fait, les miroirs découpeurs métalliques en usinage diamant deviennent des candidats sérieux pour une instrumentation astronomique dans le domaine visible pour des instruments multi IFUs. Le polissage diamant monolithique devient plus prospectif pour une production en petite série. Pour MUSE, le polissage, l'alignement et le contrôle de 1200 slices et autant de miroirs pupille réalisés de manière traditionnels comportent des risques importants qui peuvent sans doute être minimisés par l'application de procédures de management et de contrôle qualité appropriées, mais qui conduisent nécessairement à des coûts importants.

4 Conclusion

Un système découpeur d'images à trois ou deux jeux de miroirs réalisés en Zérodur est très adapté à une instrumentation spatiale ou sol mettant en place un seul IFU présentant des performances optiques inégalées par d'autres technologies. En revanche, pour une instrumentation multi IFUs, le coût de fabrication devenant contraignant, l'orientation vers d'autres technologies comme l'usinage diamant sur des métaux, moins performantes, mais moins coûteuse, semble être une piste à explorer. Cette industrie a largement progressé depuis ces dernières années puisqu'elle nous permet d'atteindre des rugosités inférieures à 5 nm RMS, permettant de l'appliquer à une instrumentation dans le domaine visible. Malgré tout, des améliorations sur les procédés de fabrication restent nécessaires.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Fin 2002, les objectifs de mon travail de thèse étaient de prouver la faisabilité d'un nouveau type de spectrographe intégral de champ pour permettre son implantation dans l'instrumentation du JWST et du VLT. Notamment, les aspects suivants devaient être couverts :

- La modélisation des performances d'un système découpeur d'images, avec prise en compte, en particulier, de la qualité optique et des effets de diffraction afin d'affiner les cahiers des charges, et si possible, d'en simplifier les procédés de fabrication.
- Le suivi de la réalisation de prototypes correspondant à l'instrumentation du JWST et du VLT, avec une participation active à la définition des méthodes de fabrication, d'assemblage et de test des composants optiques individuels et assemblés, en prenant en compte les contraintes spécifiques à des multi-IFUs comme MUSE, et à un environnement spatial pour NIRSpec.
- Les tests de performances optiques des prototypes complets.
- L'analyse des résultats de ces tests de performances, et leur comparaison avec les prédictions des modèles théoriques développés dans le cadre de la thèse, en identifiant les points de désaccord et en proposant des solutions pour l'avenir.

Après une brève introduction décrivant les instruments astronomiques, le Chapitre 2 expose deux outils logiciels permettant une connaissance plus approfondie des systèmes découpeurs d'images. Le premier logiciel calcule le pourcentage de zones de blocages des rayons lumineux sur le miroir découpeur pouvant conduire à une perte de lumière. Le second offre une modélisation des systèmes découpeurs d'images en tenant compte des effets de la diffraction, des aberrations géométriques et des défauts d'états de surface des éléments optiques. Ces deux logiciels m'ont permis d'approfondir mes connaissances en optique de Fourier et d'ouvrir de nombreuses discussions avec des astronomes et des ingénieurs du CRAL.

Le Chapitre 3 entre dans le cœur du sujet. Après avoir étudié des designs optiques de systèmes découpeurs d'images, le premier prototype, nommé CRAL, constitue une première mondiale de par sa fabrication, son assemblage et sa qualification sur banc optique. En effet, il repose sur un système découpeur d'images à trois matrices de miroirs. Le miroir découpeur, pièce maîtresse, est composé d'un empilement de 11 miroirs sphériques et tiltés, adhésés moléculairement entre eux. Après avoir participé activement à sa définition, sa fabrication et ses tests, les résultats montrent quelques non-conformités, mais qui restent très encourageantes pour les futurs prototypes. Un second prototype, nommé ESA, a été étudié, fabriqué, assemblé puis testé, en collaboration avec le LAM et l'Université de Durham. Tirant profit des conclusions du prototype CRAL, j'ai orienté la fabrication et l'assemblage des éléments optiques, qui ont été modifiés afin d'éliminer les éclats de bord et de rendre le découpeur d'images contrôlable en temps réel grâce à un nouvel outil d'assemblage optique. C'est ainsi que la qualité image obtenue, associée à un excellent alignement a permis de valider la fabrication des optiques par Cybernétix. De plus, des tests de vibrations et à 50 K, auxquels j'ai participé, ont démontré que la stabilité de la structure optomécanique et la qualité des performances optiques étaient maintenues. Grâce à l'expérience acquise sur ces deux prototypes, qui m'a permis d'acquérir des méthodes de tests et de collaborer avec des instituts de recherche européens, l'Observatoire de Lyon se positionne aujourd'hui comme l'un des leaders mondiaux des systèmes découpeurs d'images, et plus précisément sur ceux

fabriqués en technologie verre. A partir de là, mon travail de thèse a évolué, entraînant mon implication dans un grand projet comme MUSE.

Motivé par de nombreux projets scientifiques et fort de l'expérience recueillie sur les découpeurs d'images, le CRAL a répondu à un appel à propositions de l'ESO concernant la seconde génération d'instruments du VLT en proposant MUSE (Multi Unit Spectrograph Explorer). Instrument imposant, dont le champ de vue est de une minute d'arc, divisé par une pré optique en 24 sous champs qui nourrissent chacun un système découpeur d'images associé à un spectrographe. Afin de répondre aux spécifications de MUSE, un découpeur d'images original, alliant miroir découpeur et barrettes de mini lentilles, a été proposé. Afin de prouver la faisabilité de ce nouveau système, un prototype représentatif de l'instrument MUSE a été fabriqué puis testé. Malgré des dimensions géométriques et des spécifications de haut niveau trois fois supérieures aux deux autres prototypes, les résultats des tests optiques dans les plans image et pupille du système se sont révélés pour la plupart conformes aux spécifications, validant le système découpeur d'images pour la fin de l'étude de faisabilité. Ce dernier prototype, dont j'avais la responsabilité au sein du projet MUSE, clôt et qualifie les systèmes découpeurs d'images en technologie verre pour des instrumentations spatiales ou sols. Le Tableau 1 montre l'évolution des caractéristiques et des spécifications pour les trois prototypes testés au CRAL.

| | Prototype CRAL | Prototype ESA | Prototype MUSE |
|--|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Nombre de slices empilées | 11 | 30 | 38 |
| Nombre de slices testées | 10 | 5 | 12 |
| Grandissement du système découpeur d'images | 0.148 | 0.082 | 0.043 |
| Dimension d'une slice (mm) | 18.9 x 0.9 | 27 x 0.9 | 81 x 1.59 |
| Rapport Longueur/Largeur des slices | 21 | 30 | 51 |
| Spécifications d'alignement des slices (secondes d'arc) | 60 | 30 | 9 |
| Surface du champ découpé (mm ²) | 714 | 729 | 4894 |
| Dimensions des optiques secondaires – miroirs ou lentilles (le long de la fente en mm) | 3.04 | 2.75 | 7.33 |
| Nombre d'IFU total à construire pour l'instrument | 1 | 2 x 4 | 24 |

Tableau 1 : Caractéristiques des systèmes découpeurs d'images en verre testés au CRAL

Malgré des performances optiques remarquables, l'inconvénient majeur de ces systèmes est leur coût de fabrication, défavorisant leur introduction dans des instruments multi IFUs. C'est pour cette raison que, en vue d'une production en série des découpeurs d'images de MUSE, un nouveau concept, basé sur deux matrices de miroirs a été proposé. Il semble plus adapté à une production en série utilisant les progrès de la technologie par usinage diamant. Trois prototypes en métal ont donc été fabriqués et testés à l'Observatoire de Lyon. Chaque fournisseur étant libre de choisir son matériau et sa méthode de fabrication afin de répondre au nouveau cahier des charges. Les tests effectués au CRAL, auxquels j'ai apporté mon expertise, ont montré que la méthode par assemblage individuel des slices, est largement hors spécifications. En revanche, une approche d'usinage monolithique des optiques permet d'atteindre les spécifications d'alignement. Après l'avoir testé sur banc optique, quelques non-conformités apparaissent sur le miroir découpeur – Profil de forme non sphérique sur la largeur de la slice créant un élargissement de la pupille et absence de coating sur les slices les plus inclinées. Ces non-conformités peuvent être corrigées par une modification, soit du design soit du procédé de fabrication, et sont en cours de discussion avec l'industriel. Néanmoins, il existe des signes encourageants pour l'avenir comme la rugosité, qui est passée

de 15 à 5 nm RMS, en cinq années de développement. Moyennant encore quelques efforts dans le procédé de fabrication, ces prototypes proposent une alternative aux découpeurs d'image en verre pour des instruments multi IFUs dans le domaine de longueur d'onde proche infrarouge.

Un dernier chapitre offre une comparaison détaillée, argumentée et s'appuyant sur mon expérience réelle de près de quatre années d'étude, sur l'adaptabilité de chaque système et de chaque technologie aux différents instruments. En effet, atteignant des performances optiques inégalées jusqu'à ce jour, les découpeurs d'images en technologie verre sont adaptés à tous types d'instrumentations. En revanche, une alternative doit être trouvée pour des instruments multi IFUs puisque l'inconvénient majeur de la technologie verre est son coût. Cette alternative peut être trouvée dans la technique d'usinage diamant sur des métaux, qui a fait des progrès considérables ces dernières années, bénéficiant de la R&D mondiale de la branche métallurgie.

Personnellement, je pense qu'une solution possible pour les instruments multi IFUs comme MUSE et KMOS pour le VLT, MOMFIS pour OWL (Figure 1) et l'instrumentation des ELT, est de combiner les deux technologies étudiées dans ces chapitres. En effet, de part sa géométrie, le miroir découpeur est l'objet le plus difficile à réaliser. Ayant prouvé que la technologie verre satisfaisait pleinement les spécifications, il est préférable qu'il soit fabriqué en verre. Quant aux miroirs secondaires, pouvant être disjoints et présentant un rapport Largeur/Hauteur de l'ordre de 2, ils peuvent être fabriqués en métal par usinage diamant, au prix d'une validation sur banc optique.

Ce travail de thèse m'a permis d'acquérir une réelle expertise sur les systèmes découpeurs d'images pour la spectroscopie intégrale de champ, s'appuyant sur trois communications SPIE présentées en Annexe 3 et sur deux publications de rang A en cours de révision. Ces colloques nationaux et internationaux m'ont permis d'échanger des idées et de transmettre mes connaissances sur les systèmes découpeurs d'images. De plus, mon implication rapide dans de grands projets comme NIRSpec et MUSE, m'a permis de côtoyer divers consortiums européens. De plus, ce travail de thèse met en avant la recherche industrielle française de par la collaboration avec Cybernétix, finançant un contrat CIFRE pour la validation de concepts innovants et originaux.

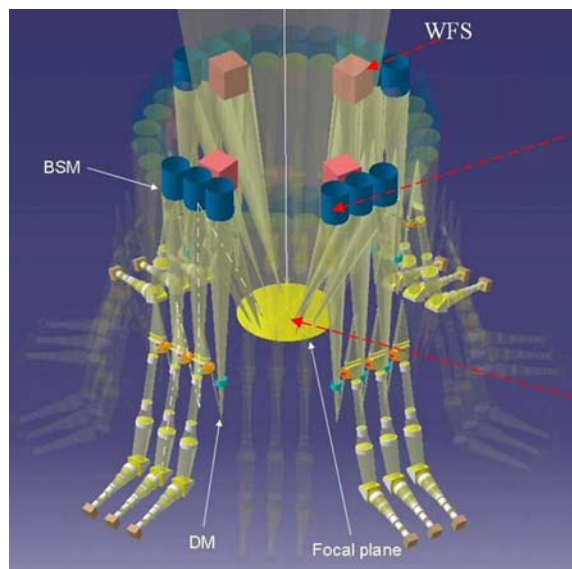


Figure 1 : Exemple de dessins mécaniques de l'instrument MOMFIS pour OWL à 30 IFUs

ANNEXES

ANNEXE 1

CALCUL DES ZONES DE BLOCAGES SUR UN SYSTEME DECOUPEUR D'IMAGES

1 Introduction

Ce programme permet de calculer la proportion de rayons bloqués lors du passage d'un faisceau sur un slicer¹⁴. Après avoir défini ses caractéristiques géométriques, le programme simule un tracé de rayons sur un slicer. Une interface homme machine simplifie l'utilisation de ces programmes (RayTrace).

2 Principe du calcul

Le principe de calcul du logiciel de calcul des zones de blocages, nommé « RayTrace » est présenté sur la Figure 2. Il est constitué de trois programmes différents :

- « Nouveau Slicer », qui permet de renseigner sur les caractéristiques du slicer,
- « Assembler Slicer », assemblant plusieurs slicers identiques,
- « Raytrace2 », évaluant le pourcentage de rayons bloqués.

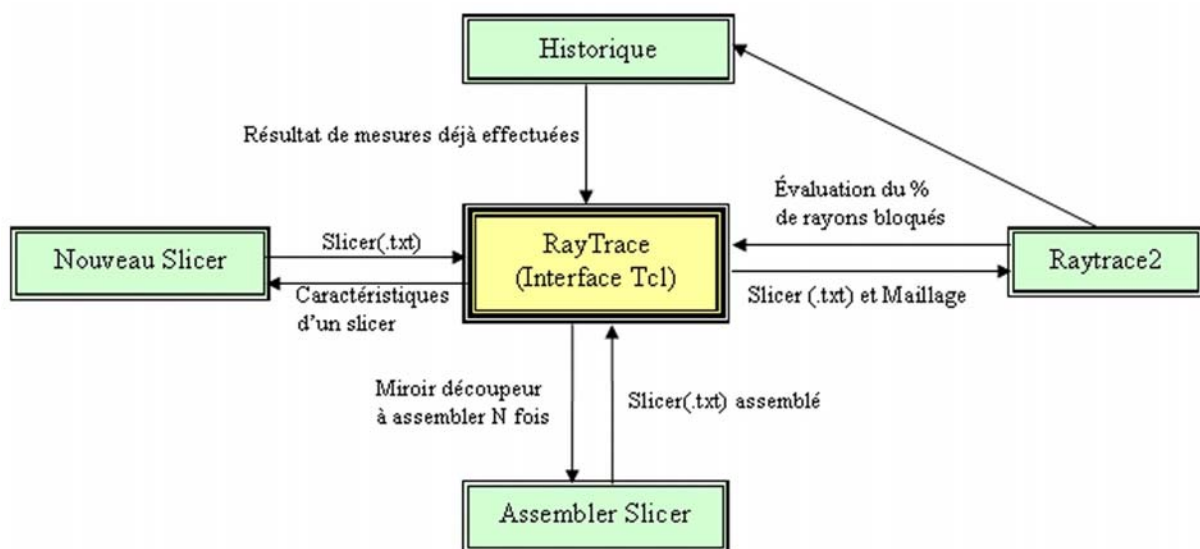


Figure 2 : Organigramme de RayTrace

¹⁴ Dans cette annexe, on désigne par slicer, le miroir découpeur défini dans le mémoire de thèse.

3 Outils de calcul

3.1 Caractéristiques des slices

Cette application, programmée en Tcl, crée un fichier texte, nommé slicer.txt, contenant les caractéristiques d'un nouveau slicer.

La première fenêtre demande les caractéristiques générales de ce nouveau slicer:

1. N_s : Nombre de slices,
2. Les limites physiques de la surface active du slicer (en mm) ; allant de $X=X_{min}$ à $X=X_{max}$ et de $Y=Y_{min}$ à $Y=Y_{max}$,
3. La distance d entre la pupille et le centre du slicer (en mm),
4. Les dimensions de la pupille elliptique: a_x est le grand axe (suivant x par défaut) et a_y le petit axe (suivant y),
5. L'incidence ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) en degrés du faisceau par rapport au centre du slicer,
6. La valeur $Z=constante$ du plan objet moyen.

Une seconde fenêtre demande les caractéristiques de la première slice. Cette opération est à renouveler autant de fois qu'il y a de slices. Chacune des 5 surfaces de la slice doit être définie avant de cliquer sur le bouton « slice suivante ».

Une surface est définie par 5 paramètres (Figure 3):

- Son type : Plan ou Sphère,
- Trois paramètres x, y, z qui sont les coordonnées du centre de la sphère ou la normale au plan
- Le paramètre h qui est soit le rayon de la sphère soit la position du plan

Une fois toutes les slices définies, l'utilisateur enregistre le nouveau slicer.

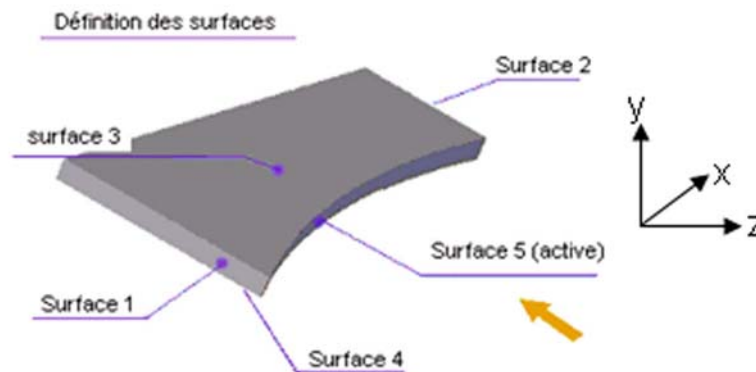


Figure 3 : Définition des surfaces d'une slice

Une fonction « Assembler Slicer » permet de créer un nouveau slicer composé d'un assemblage de slicers identiques. Il se comporte comme un slicer normal.

À l'exécution de « Assembler Slicer », le programme demande le nombre de slicers à assembler avec pour chacun d'eux, sa position relative du centre de sa surface active à celle du premier slicer.

3.2 Création d'un modèle de calcul des zones de blocages sous Tcl/Tk et C++

Le programme « Raytrace2.exe » simule un tracé de rayons sur le slicer afin de déterminer le pourcentage de rayons perdus. Il utilise un slicer sous format texte (§ 3.1), qui possède tout les paramètres nécessaires à cette simulation. L'utilisateur ne doit entrer que les paramètres du maillage des points objet et le nom du fichier du slicer à analyser.

Pour chaque point objet placé sur le slicer, on trace N_r rayons. Chaque point objet est espacé des distances D_x suivant l'axe x et D_y suivant l'axe y . Chaque rayon envoyé de la pupille

d'entrée vers un point objet est analysé : s'il ne touche pas de surface active, il est comptabilisé comme un rayon perdu.

3.2.1 Précision du maillage : Programme « Eff.exe »

Avant que la simulation du tracé de rayon commence, le programme Eff.exe est lancé. Celui-ci cherche la valeur optimale de Dx et Dy pour l'obtention rapide d'un résultat. Soit :

- axpmoy, aypmoy: la taille moyenne de l'image de la pupille sur le slicer suivant les axes x et y,
- axp, ayp : les grand et petit axe de la pupille image,
- ax, ay : les grand et petit axe de la pupille objet.

Le programme « Eff.exe » donne les conditions à respecter sur Dx et Dy, pour obtenir un maillage précis ou rapide (Tableau 2).

| | Dx | Dy |
|-----------------|---|--|
| Maillage précis | $< 2 \times \text{axpmoy} \times \ln(1/0.03)$ | $< 2 \times \text{ay}/\text{ax} \times \text{axpmoy} \times \ln(1/0.03)$ |
| Maillage rapide | $< 100 \times \text{axpmoy}$ | $< 100 \times \text{ay}/\text{ax} \times \text{axpmoy}$ |

Tableau 2 : Conditions sur Dx et Dy afin d'obtenir un résultat précis ou rapide

3.2.2 « Raytrace2.exe » : Descriptif

'Raytrace2.exe', est un programme en C++, dont l'organigramme est présenté sur la Figure 5, qui simule un tracé de rayons permettant de calculer les zones de blocages sur un slicer.

Dans un premier temps le programme récupère les paramètres entrés par l'utilisateur :

- Dx, Dy : distance entre les points objet,
- Nr : nombre de rayons par point objet,
- Le fichier « slicer.txt » du slicer à modéliser.

Le programme récupère ensuite tous les paramètres se situant dans l'en-tête du fichier slicer.txt : Ns, Xmax, Xmin, Ymax, Ymin, ax et ay, d, θ_x , θ_y , θ_z et Pmoy

Un point courant est créé de manière à parcourir le plan objet ($z=P_{moy}$ entre $[X_{min}, X_{max}]$ et $[Y_{min}, Y_{max}]$) de gauche à droite et de bas en haut avec un pas Dx suivant l'axe x et Dy suivant l'axe y. Pour chacun des Nr rayons tracés, le programme procède comme suit :

- Un rayon est tracé entre un point de la pupille et le point objet courant. Pour les Nr rayons, le point à l'intérieur de la pupille suit une fonction en ellipses concentriques correspondant à un maillage régulier à l'intérieur de celle-ci (Figure 4).

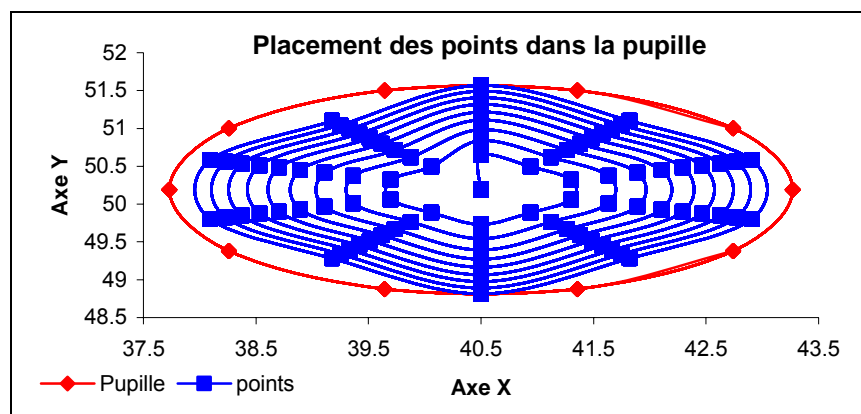


Figure 4 : Placement des points sur la pupille d'entrée

- Le programme recherche des intersections pour chacune des surfaces de chacune des slices. Une intersection entre le rayon courant et la surface courante est valide si elle se trouve bien à l'intérieur des dimensions de la slice. Lorsqu'une intersection est trouvée et qu'elle est plus proche de la pupille que celle précédemment retenue, on la garde comme solution. Une fois que toutes les surfaces ont été examinées, l'intersection retenue est testée.
- Si le programme n'a pas trouvé d'intersection, soit le rayon n'a pas touché le slicer, soit il l'a déjà touché et alors la simulation de ce rayon est terminée.
- Si une intersection est trouvée, on regarde la nature de la surface touchée : si la surface est plane on arrête le rayon et on le comptabilise comme perdu. Si la surface est sphérique, on continue la simulation de ce rayon. Pour éviter les réflexions multiples, on arrête tous les rayons au delà de deux intersections.

Pour les rayons ayant touché une surface réfléchissante pour la première fois, on calcule le rayon réfléchi. Son origine est prise sur la nouvelle intersection et sa direction telle qu'il respecte les lois de Descartes pour la réflexion. Avec ce nouveau rayon, on reprend la recherche des intersections.

Après la simulation de tous les rayons, on incrémente les compteurs généraux qui sont la somme de tout les rayons bloqués sur des plans et de ceux n'ayant pas touché le slicer. Le pourcentage de rayons perdus est enregistré pour ce point objet dans un fichier texte, « map.txt ».

Ensuite, on incrémente la position du point objet courant et on recommence pour le nouveau point objet.

Lorsque tout le plan objet a été modélisé, on enregistre le pourcentage total de rayons perdus.

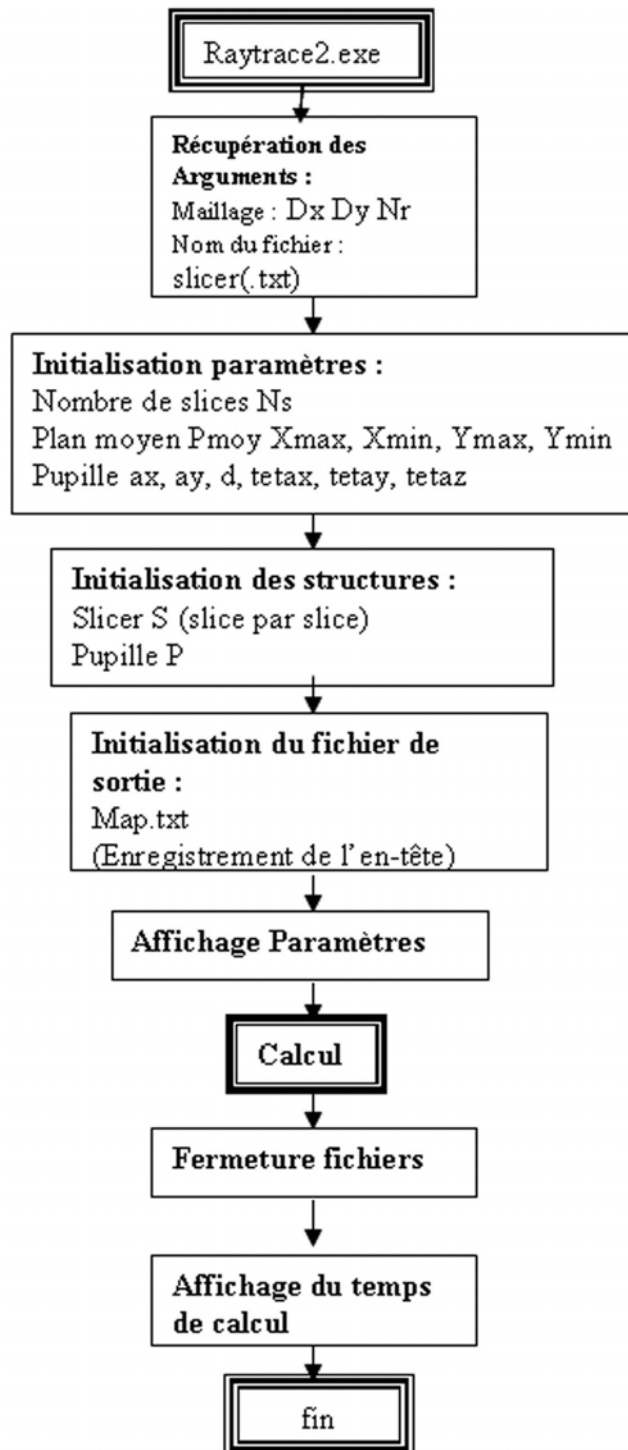


Figure 5 : Organigramme de Raytrace2.exe

L'affichage de fin de calcul donne tout les paramètres du slicer ainsi que le temps de calcul et le pourcentage de rayons perdus sur l'ensemble du slicer. Le nom du slicer, le maillage objet Dx, Dy et Nr ainsi que le pourcentage de rayons perdus sur tout le slicer sont recopiés dans l'Historique.

Les résultats détaillés sont placés dans le fichier « map.txt » sous forme d'une matrice. Pour chaque point objet le programme enregistre le pourcentage de rayons perdus aux coordonnées du point objet. On obtient ainsi une carte des blocages sur le slicer qui permet de localiser les zones bloquantes.

4 Résultats du calcul des zones de blocages pour différents slicers

Une première mesure a été effectuée sur le slicer de Phase A de l'instrument MUSE comportant 38 slices. Les premières mesures avec un maillage objet assez grand ont permis d'observer l'influence du choix du maillage sur le nombre de rayons perdus.

Lorsque le maillage n'est pas assez précis, le résultat varie beaucoup. En effet pour des points objet trop espacés, le programme peut éviter les zones aux bords des slices, là où un grand nombre de rayons peuvent être perdus. Plus le maillage est précis plus le résultat se stabilise (Tableau 3). Sur le slicer Muse de Phase A, 0.61 % des rayons sont perdus. Malgré une longueur des slices de 81 mm, ce faible pourcentage est dû à un design possédant des angles continus et faibles entre chaque slice laissant peu de surfaces non actives apparentes.

| Slicer de Phase A de l'instrument MUSE | | | |
|--|-------|-----|------------------------------|
| Dx | Dy | Nr | Pourcentage de rayons perdus |
| 10 | 10 | 100 | 0 |
| 5 | 5 | | 0 |
| 4 | 4 | | 0 |
| 3 | 3 | | 0,442177 |
| 2 | 2 | | 0,147915 |
| 1,5 | 1,5 | | 0,473614 |
| 1 | 1 | | 0,38984 |
| 0,8 | 0,8 | | 0 |
| 0,5 | 0,5 | | 0,3545 |
| 0,7 | 0,7 | | 0,367023 |
| 0,6 | 0,6 | | 0,399316 |
| 0,4 | 0,4 | | 0,173817 |
| 0,1 | 0,1 | | 0,577296 |
| 0,4 | 0,025 | | 0,631847 |
| 0,4 | 0,01 | | 0,617126 |
| 0,33 | 0,005 | | 0,617228 |
| 0,4 | 0,008 | | 0,618737 |

Tableau 3 : Pourcentage de rayons perdus en fonction du maillage sur le slicer Muse de Phase A

Une seconde série de calculs a été effectuée sur l'un des cinq slicers de la Phase de Design Préliminaire de MUSE. Après la détermination d'un maillage suffisant, 1.55 % des rayons sont perdus. Bien que possédant 12 slices de 28.8 mm de long, ce slicer bloque plus de rayons que le précédent, puisqu'il présente de plus grandes surfaces non actives et visibles. De plus, il est composé de cinq blocs espacés entre eux. Le pourcentage de zones de blocage pour le slicer complet sera plus grand que celui trouvé ci-dessus.

Enfin, sur le slicer de l'IFU de NIRSpec, composé de 42 slices, seulement 0.2% des rayons sont perdus.

5 Conclusion

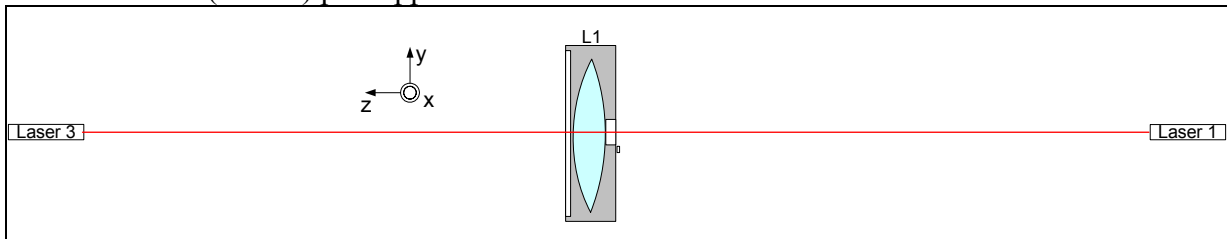
Un logiciel d'évaluation des zones de blocage d'un slicer a été développé et validé. Ce logiciel facile d'utilisation est adaptable à tous types de slicers. Il apporte un complément d'information rapide lors de la comparaison de deux slicers.

ANNEXE 2

PROCEDURE D'ALIGNEMENT DU BANC OPTIQUE DU PROTOTYPE MUSE EN TECHNOLOGIE VERRE

1 Choix de la référence

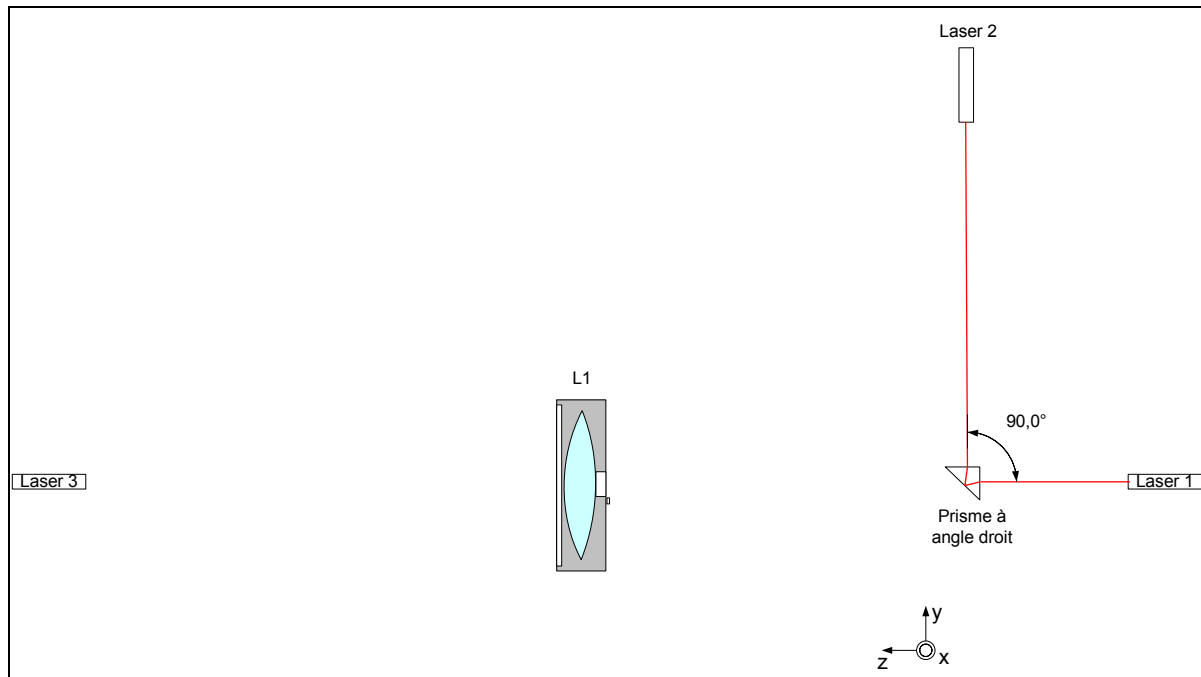
L'axe optique de référence z est imposé par le couple laser HeNe (laser 1) et la lentille L1. On réalise alors une autocollimation laser sur L1. En pointant le laser vers L1, la face avant renvoie le faisceau vers le laser et doit être réinjecté dans celui-ci. Si l'on veut corriger parfaitement le tilt et le décentrement, on utilise la seconde face de L1 pour obtenir des anneaux de Newton que l'on centrera sur la sortie du laser (précision de l'ordre de 10 secondes d'arc en tilt et 0.3 mm en décentrement). De l'autre côté de la lentille L1, on aligne une diode laser (laser 3) par rapport au laser 1 et à L1.



2 Réglage des axes lasers

Nous utilisons deux axes lasers, l'axe y avec le laser 2 et l'axe z avec le laser 1 placé derrière le miroir découpeur. L'axe y est réglé en intercalant un prisme de référence (sur une platine tip tilt et une platine de rotation) devant le laser 1 à peu près à la position du miroir découpeur sur l'axe z . On utilise la première face du prisme pour réinjecter le spot dans le laser 1 (réglage en θ_x du prisme). En réglant θ_y , la seconde face du prisme renvoie un spot sur le laser 1.

Puis on dispose un laser (laser 2) à grande distance (environ 3 m) et on le règle sur la face du prisme de manière à réinjecter le faisceau dans ce laser. En jouant sur le θ_z du prisme et le décentrement en x du laser 2, le faisceau doit ainsi pénétrer dans le laser 1 et inversement (précision inférieure à 17 secondes d'arc).

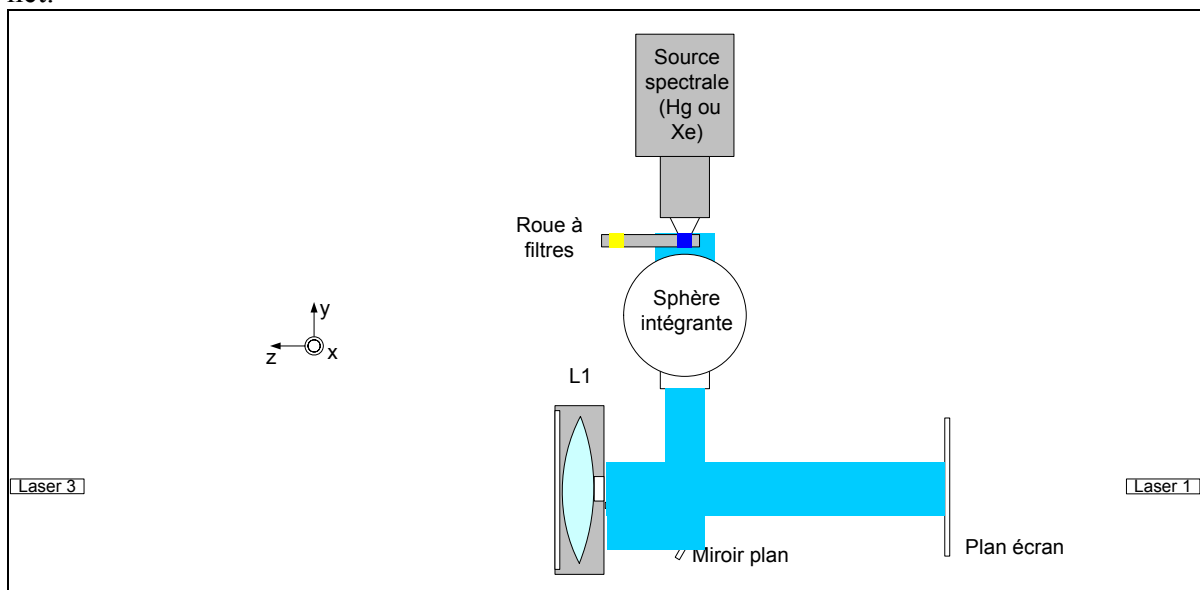


3 Alignement de la caméra

On doit maintenant aligner la caméra de détection en tilt autour de x et y et en décentrement suivant x et y en continuant la procédure précédente. La caméra est placée devant le laser 3, dans l'alignement des lasers 1 et 3. Les axes de translation x, y et z de la détection devront être alignés sur les axes définis par la référence laser 1- L1. On repère alors les coordonnées de l'axe optique sur le rack MM4006 (position absolue des moteurs 3,4 et 5).

4 Positionnement du petit miroir sphérique

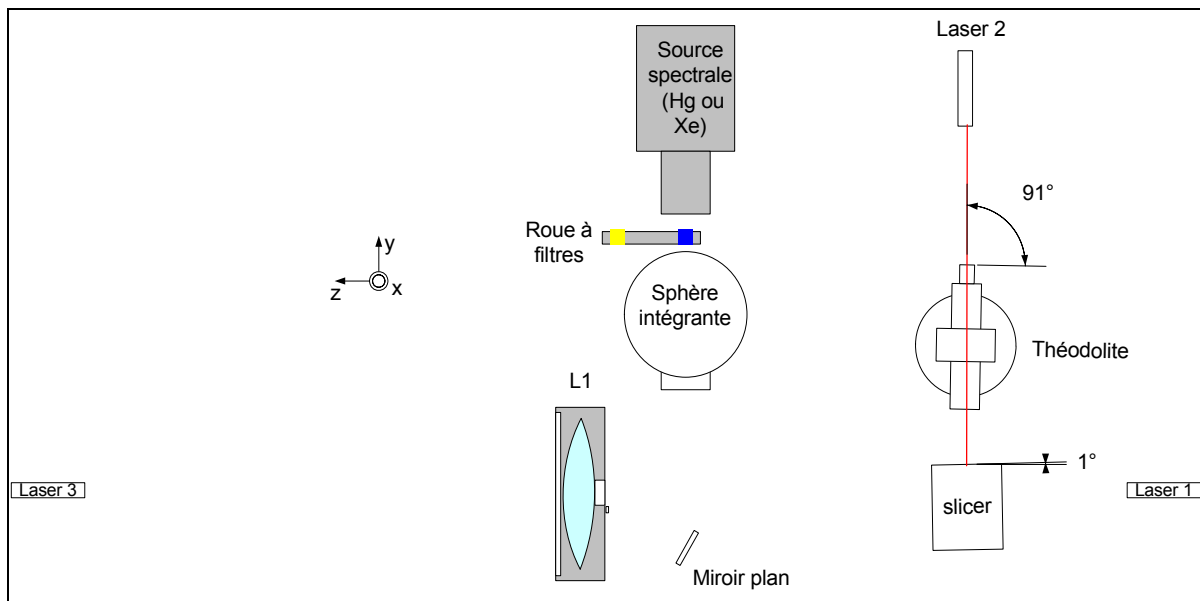
Le miroir sphérique matérialise la pupille du télescope et se trouve à 11,91 mm devant le barillet de L1. On lui donne un tilt θ_x (vertical) de manière à obtenir un cercle de lumière homogène centré sur l'axe optique. Dans le plan du miroir découpeur, le cercle doit apparaître net.



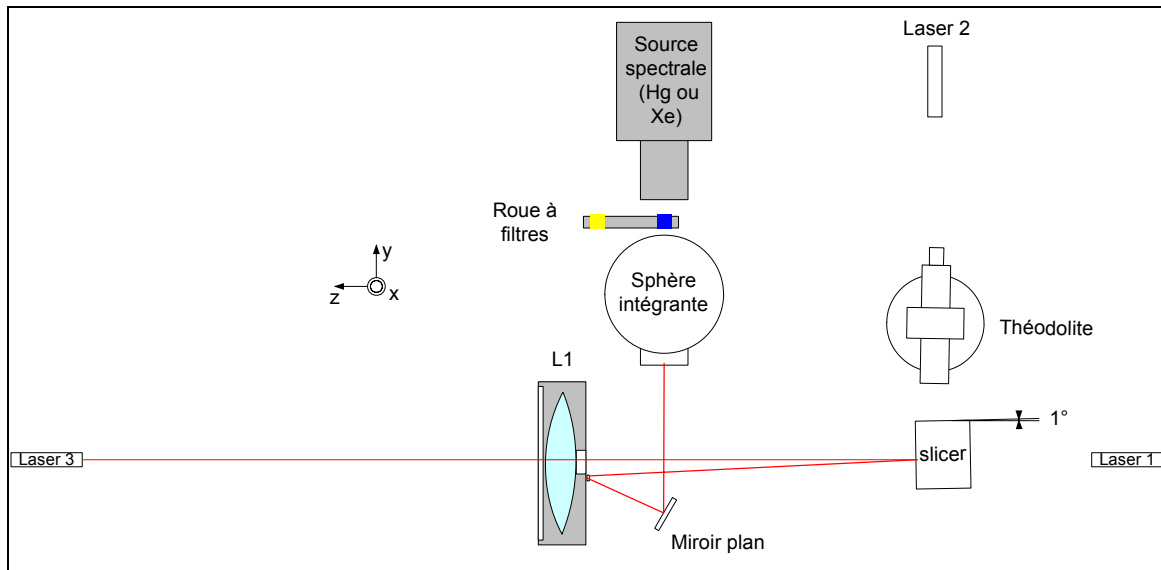
5 Positionnement du miroir découpeur

Avant de réaliser l'alignement du miroir découpeur, il faut s'assurer de la colinéarité des axes des platines de micro-positionnement supportant le miroir avec les axes optiques du banc et du miroir découpeur.

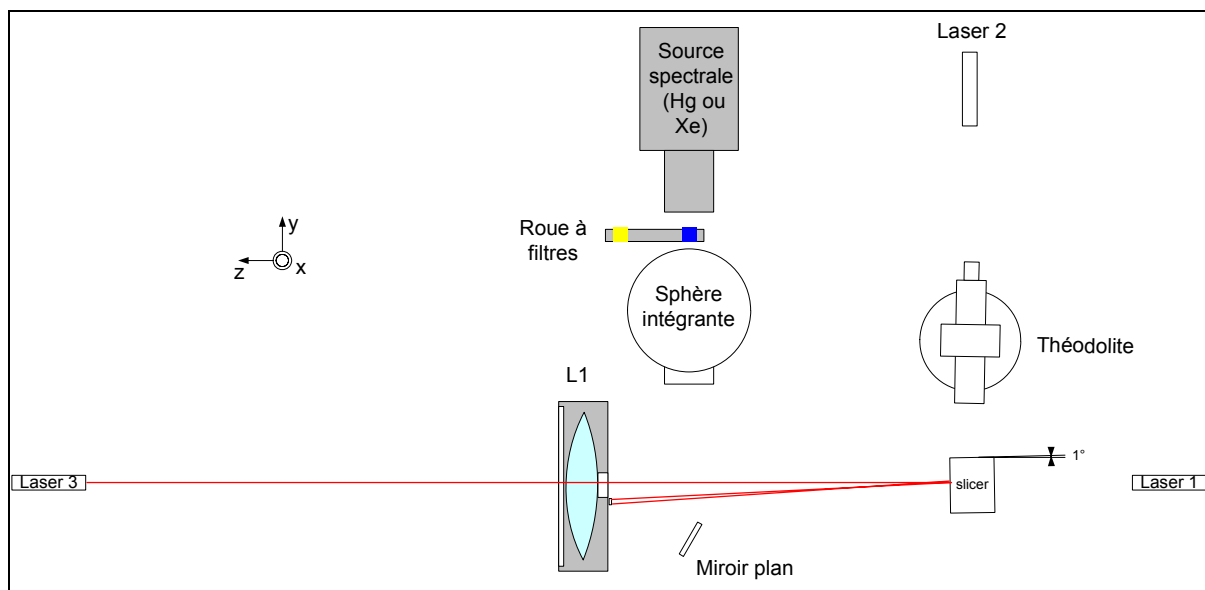
- La hauteur du miroir découpeur est pré-réglée au réglet avec $149.6 - 40 = 109.6$ mm entre le cavalier et le côté du talon du miroir découpeur.
- Le miroir découpeur se trouve à 600,72 mm de L1 donc à $600.72 - 13.81 = 586.91$ mm du barillet de L1 et à 575 mm du miroir sphérique (mesure au réglet). On affine ce réglage en faisant la mise au point des pupilles sur les masques pupilles (le réglage exact se fera ultérieurement).
- Les tilts autour de x et z sont corrigés par autocollimation sur la face supérieure du miroir découpeur à l'aide du laser 2 donnant un axe y perpendiculaire à l'axe optique. Nous avons une précision d'environ 15 secondes d'arc sur le tilt du miroir découpeur, soit le déplacement du spot retour du laser 2 de 0,5 mm à 3 m. Le tilt autour de y est réglé de la même manière à l'aide du laser 3 sur les slices inactives, par exemple la slice n°18 (voir point 6).
- En intercalant un théodolite entre le laser 2 et le miroir découpeur (sur l'axe y), on réalise une autocollimation sur la face supérieure du miroir découpeur et on l'incline de -1° (valeur nominale) à 3 secondes d'arc près autour de x.



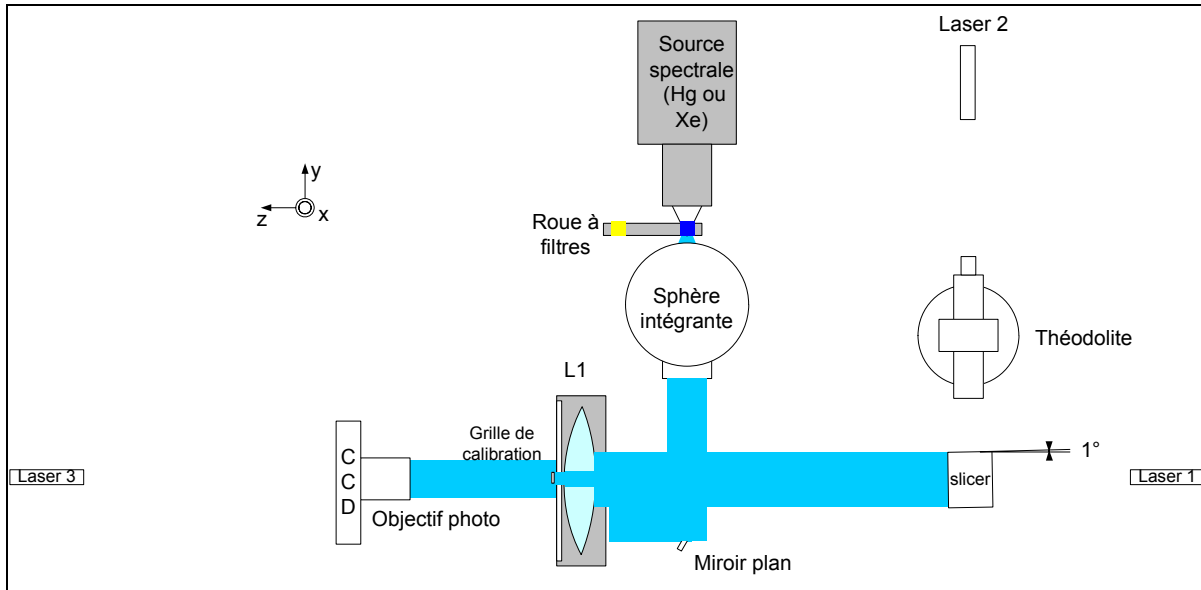
- Le laser 3 se réfléchit alors sur une slice plane (n°18), puis au centre de la pupille elliptique sur le miroir sphérique et pénètre enfin dans la sphère intégrante en passant au centre du champ.



- On décentre alors le miroir découpeur suivant x pour que le faisceau se réfléchisse entre la slice 20 et 21 et donne un double spot autour de la pupille elliptique (petit miroir sphérique).



- Alignement fin du miroir découpeur en z : les pupilles intermédiaires se trouvent à 0,75 mm avant les PLR. On place alors une mire à cette position et on fait la mise au point de la détection sur cette mire. Puis, la mire retirée, on déplace le miroir découpeur avec un pas de 100 μm suivant l'axe z jusqu'à avoir les pupilles intermédiaires nettes sur le CCD.



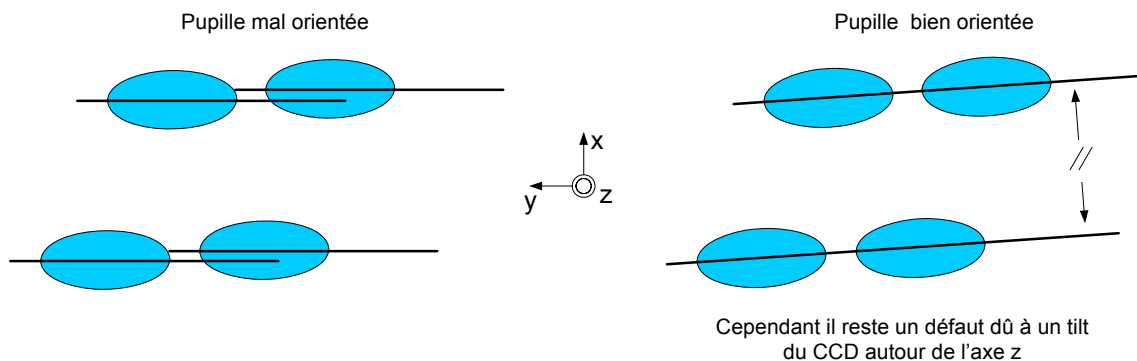
- En se positionnant derrière le miroir découpeur, on vérifie à l'oeil que toutes les slices soient bien éclairées par la pupille elliptique (pas de vignettage). Le cas échéant, on corrige le tilt du petit miroir sphérique et du miroir plan.

6 Alignement du capteur CCD

Le capteur CCD n'est pas parfaitement parallèle au boîtier de la caméra, il faut donc l'aligner en imageant les slices du miroir découpeur sur le capteur CCD et tilter la caméra autour de z jusqu'à qu'une slice suive une ligne de pixel au demi pixel près sur la longueur de la slice.

7 Tilt de la pupille du télescope

Le tilt de la pupille induit des « marches d'escalier » lorsque que celle-ci n'est pas bien verticale. On corrige cet effet en tournant le masque pupille et en imageant les pupilles au travers du miroir découpeur et de L1 (en l'absence des autres optiques)

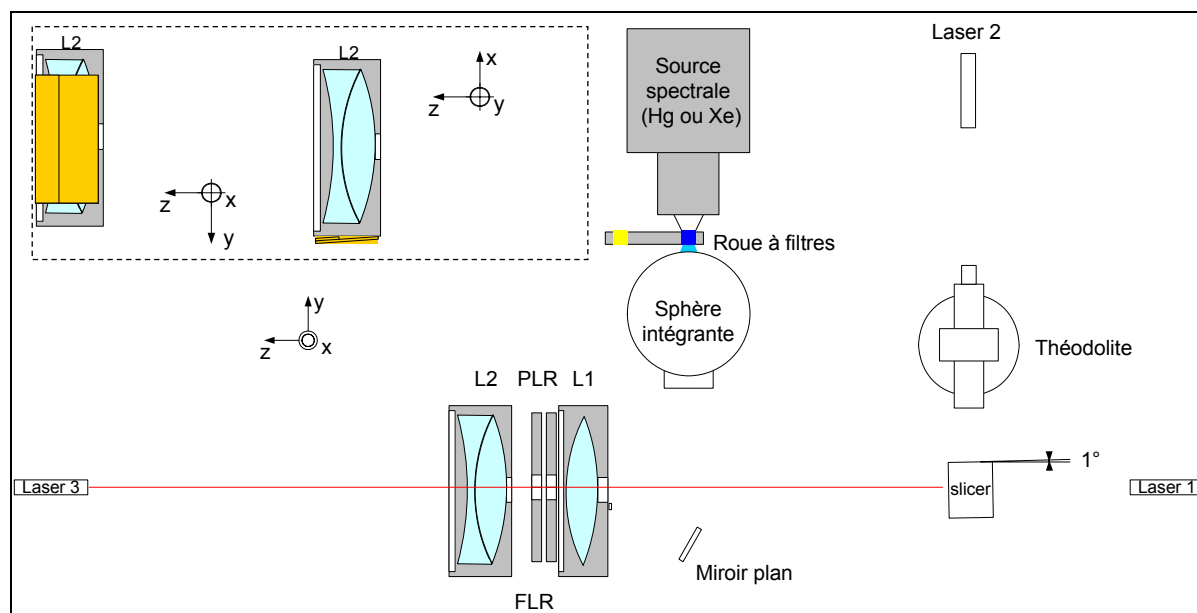


8 Alignement de L2

On place le barillet de L2 à la bonne distance grâce à une cale de 25.63 mm.

On réalise l'autocollimation de L2 de la même manière que pour L1. Pour cela, on dispose de 2 cales de laiton de 1 dixième de mm : l'une (la plus large), placée sous la plus grande surface

du barillet agit en décentrement, tandis que l'autre (la petite), placé derrière le barillet, ajuste le tilt. On obtient alors des franges plus larges et centrées sur le laser 1.

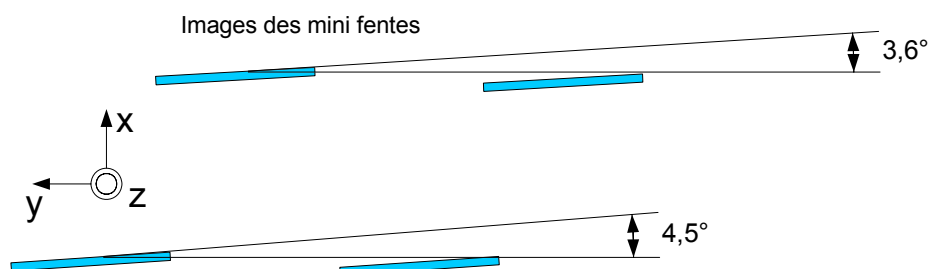


9 Réglage en x des PLR & FLR

Elles sont réglées théoriquement à partir de l'axe optique laser à l'aide des afficheurs numériques des pieds à coulisse (précision 1/10 de mm).

10 Tilts des PLR & FLR

Les PLR et les FLR sont montées sur 2 disques pouvant tourner autour de l'axe z. L'angle de tilt est prérégulé par mesure mécanique sur un tour. Il sera ajusté en fonction des images des mini fentes pour faire disparaître les « marches d'escaliers ».



Un réglage ultime des tilts θ_z des FLR est réalisé en observant la pupille de sortie derrière L2.



ANNEXE 3

PUBLICATIONS

Laurent, Florence; Bonneville, Christophe; Ferruit, Pierre; Henault, Francois; Lemonnier, Jean-Pierre; Moreaux, Gabriel; Prieto, Eric; Robert, Daniel, 2004, “Optical Design, Fabrication and Testing a prototype of the NIRSpec IFU”, Proc. SPIE, 5252, 443

Laurent, Florence; Macaire, Charles; Blanc, Pierre-Eric; Prieto, Eric; Moreaux, Gabriel; Robert, Daniel; Ferruit, Pierre; Bonneville, Christophe; Hénault, François; Robertson, David; Schmoll, Juergen, 2004, “Designing, manufacturing and testing of an advanced image slicer prototype for the James Webb Space Telescope”, Proc. SPIE, 5494, 196

Laurent, Florence; Renault, Edgard; Bacon, Roland; Dubois, Jean-Pierre; Hénault, François; Robert, Daniel., 2005, «Optical design, manufacturing and tests of the MUSE Image Slicer», Proc. SPIE, 5965, 184

Optical Design, Fabrication and Testing a prototype of the NIRSpec IFU

Florence Laurent^a, Christophe Bonneville^b, Pierre Ferruit^a, François Hénault^a,
Jean-Pierre Lemonnier^a, Gabriel Moreaux^c, Eric Prieto^c, Daniel Robert^a

^a CRAL - Observatoire de Lyon, 9, Avenue Charles André, 69230 Saint-Genis-Laval, France

^b CYBERNETIX RECHERCHE, Rue Albert Einstein BP 94, 13382 MARSEILLE, France

^c LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Traverse du Siphon, 13376 Marseille, France

ABSTRACT

A group of European Research Institutes (Centre de Recherche Astronomique de Lyon (CRAL), Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM), University of Durham) and company (CYBERNETIX) have proposed to implement an Integral Field Unit (IFU) in NIRSpec instrument for the James Webb Space Telescope (JWST). After a brief presentation of the optical design of NIRSpec IFU, we will focus on the prototype of this module built by CRAL. This prototype is composed of two optical elements: a stack of eleven spherical tilted slices associated with a row of ten spherical tilted pupil mirrors. All the optical elements were manufactured by CYBERNETIX. We will introduce the fabrication procedures and an original method of assembling by molecular adhesion in order to comply with environment specifications. Afterwards, the image slicer is tested on the optical bench at CRAL. In fact, the first measure consists in placing a CCD camera in the pupil mirrors plane and determining the characteristics of the eleven images of the telescope pupil such as sizes, positions, photometric quality, diffraction effects and angular errors on slices and comparing these results with specifications. Then, the row of pupil mirrors is installed on the optical bench. In the slit mirrors plane, we observe a pseudo slit (ten images of the slices). We establish the same characteristics as in the first measure. Moreover, in the same plane, some Point Spread Function (PSF) measurements are made and we analyse the PSF in comparison with the simulation. The main results of the tests of the first image slicer prototype are presented. With the exploitation of the results, we validate and improve the image slicer systems for others instruments such as Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE, study of a second generation instrument for the European Very Large Telescope (VLT)) and the European Space Agency (ESA) Integral Field Spectrograph (IFS) prototype.

Keywords : Integral Field Spectroscopy, Image Slicer, Pupil Mirrors, NIRSpec, JWST

1. OPTICAL DESIGN OF NIRSPEC IFU

A consortium led by the Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM) is proposing to implement an integral field unit (IFU) in the near-infrared (0.5-5.0 μm) spectrograph (NIRSpec) for the future James Webb Space Telescope (JWST)¹. The main mode of the NIRSpec instrument is a multi-object spectrograph (MOS) with a $3' \times 3'$ field of view and using a micro-shutter array for object selection. The proposed, high spatial and spectral resolution IFU mode will have a $2'' \times 2''$ field of view sampled at $0.05''$ (i.e. capable of delivering 1600 spectra per exposure) and a spectral resolution around 3000. To minimise costs and impact on NIRSpec design, the IFU has been specially designed to use the same filters, spectrograph and detectors than the MOS mode of NIRSpec.

The IFU is using the advanced image slicer concept², which allows obtaining non-overlapping spectra of each spatial resolution element in the field of view. For that, the IFU fore-optics magnifies the field of view and injects it in the image slicer module, which will literally cut the image in slices (mini-slits) and rearrange them in a single, long pseudo slit at the spectrograph entrance. This image slicer is made of three optical elements (Figure 6)³.

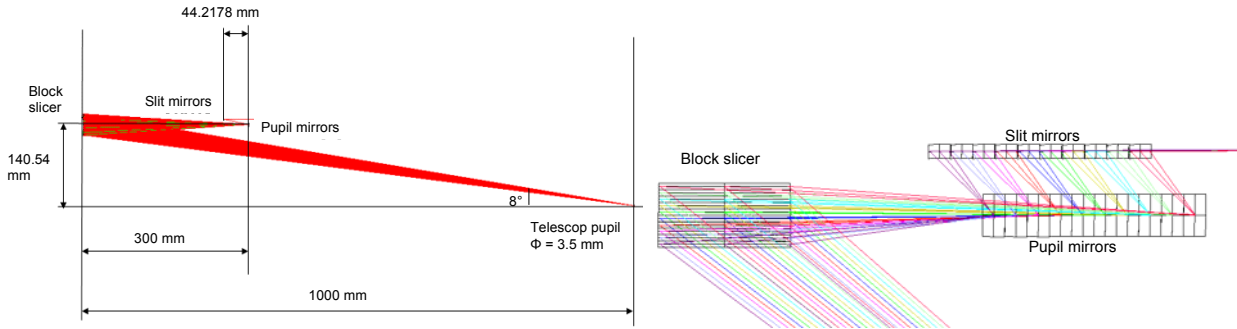


Figure 6 : Optical design of the image slicer

The first element is the slicing mirror. It redirects the beams in different directions and images the telescope pupil with a diameter of 3.5 mm at the second element. It is a stack of 42 very thin mirrors termed slices hereafter. Each individual slice is 9 mm thick and 18.9 mm long and is made of zerodur. This material presents a low thermal expansion allowing molecular adhesion and respecting spatial environment (30 K). All slices have different orientations (tilts) i.e. its curvature centre decentred along two X and Y orthogonal axes and different curvature radius. The second element is a row of 42 pupil mirrors and images the slices (i.e. the image of the telescope focal plane) on a row of 42 slit mirrors (the third element) with the correct positioning and magnification. Like the slices, the pupil mirrors are made of zerodur and have different tilts and curvature radius. Each pupil mirror measures 6 mm x 3.042 mm. The last element (slit mirrors) reimages all 42 telescope pupils at the same location, i.e. in spectrograph entrance pupil. These slit mirrors look like pupil mirrors except for their height of 4 mm. As we can see in Figure 6, the distance between the telescope pupil and the slicer is 1000 mm. As the pupil mirrors are located at 300 mm of the slicer, the magnification of the slicer is 1 out of 3. In theory, the size of the image of the telescope pupil in the pupil mirrors plane is to 1.05 mm. The slicer makes an angle of 8 degrees between the incident beam arriving to the telescope pupil and the reflected beam going to the pupil mirrors. A distance of 44.2178 mm separates the pupil mirrors from the slit mirrors and the angle created by the pupil mirrors is 11.6 degrees. In the slit mirrors plane, a slice image is 0.133 mm x 2.793 mm. All the optical elements are put on a reference support in zerodur (a cube for the stacking of slices and a bar for the others). All the components have their own coordinate system as shown in Figure 7.

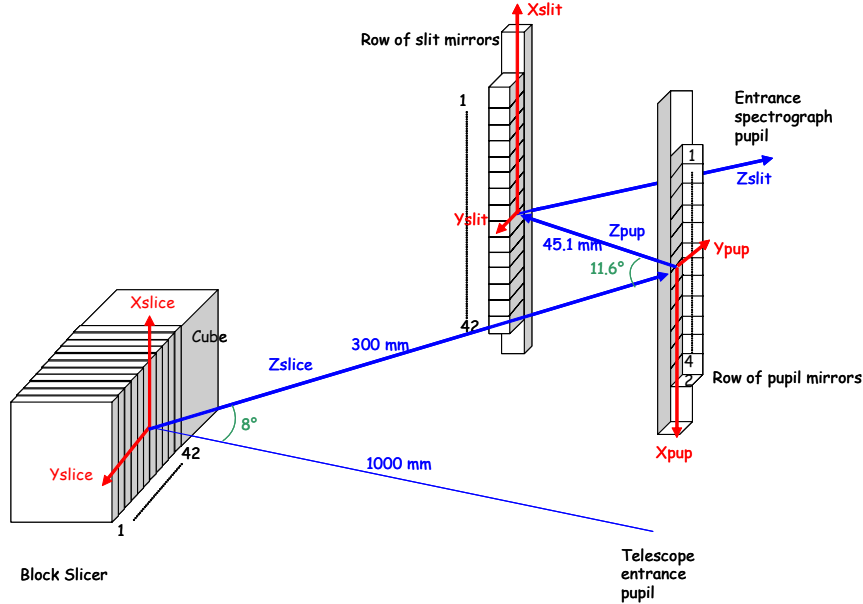


Figure 7 : Sketch of the Image slicer with the coordinate systems of each optical element

Thanks to this optical design of the image slicer, fabrication, assembling and testing have started since 2002.

2. FABRICATION AND ASSEMBLING OF CRAL PROTOTYPE

In 2001, the CRAL has proposed to develop a prototype of NIRSpec IFU as part of its research and development effort on image slicers for astronomy. This prototype will be able to demonstrate the fabrication feasibility with the respect of the narrow specifications and to prove the assembling of an image slicer. The CRAL prototype follows the optical design described in previous section. However, it is only composed of two elements: the slicing mirror with a stack of 11 spherical tilted slices adhered on the reference cube and the row of 10 pupil mirrors glued on a zerodur bar. These eleven slices are the middle slices of the initial stack of 42 with ten corresponding pupil mirrors. All slices and pupil mirrors have the same curvature radius but different tilts.

2.1 Fabrication and assembling of slicing mirror

The individual slices have been made by CYBERNETIX (France). The manufacturing is complex and long, involving a large number of steps. The spherical tilted surfaces were polished with a classical method. First, 5 mm wide rough shapes of the zerodur slices are cut in a glass block. After that, two reference plane surfaces (back side and one lateral side of the slice) are polished with a perpendicularity specification inferior to 30 arcmin. Then, the optical surfaces are polished with the specifications of $\lambda/8$. The specifications on the location of the sphere centres and curvature radii are tight (Table 1). At the end, the top and the lower faces of each slice are polished to obtain 0.9 mm thickness, a maximal flatness of $\lambda/4$ insuring a correct assembling and faces parallelism better than 5 arcseconds.

| Parameters | Target Value | Tolerance |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Slice length | 18.9 mm | $\pm 100 \mu\text{m}$ |
| Slice thickness | 0.9 mm | $\pm 10 \mu\text{m}$ |
| Sphere centre along X | Different according to slices | $\pm 34 \mu\text{m}$ |
| Sphere centre along Y | Different according to slices | $\pm 67 \mu\text{m}$ |
| Sphere centre along Z | Different according to slices | $\pm 250 \mu\text{m}$ |
| Curvature radius | 462.5 mm | $\pm 250 \mu\text{m}$ |
| Tilt around X | Different according to slices | $\pm 30''$ |
| Tilt around Y | Different according to slices | $\pm 15''$ |
| Active Surface flatness | | $\lambda/4$ |
| Faces parallelism | | $5''$ |

Table 1 : Specifications for the individual slices and the assembled slicing mirror.

Once the individual slices manufactured by CYBERNETIX, they have been checked at LAM. Angular errors and curvature radius are measured using a STIL profilometer⁴. All the elements are compliant with their specifications or in agreement with accuracy measurement which is around 1 arcmin for slice tilts. The flatness of slices are controlled using an interferometer found to be better than $\lambda/4$. After the first validation on the individual slices, the slices are positioned on the reference cube in a support with three vertical cylinders which define three referent contact points during assembling (Figure 8). Thanks to high quality reference surface, flatness and parallelism of the stacking surfaces of each slice, slices are joined by molecular adhesion. After each molecular adhesion, the back and top slice surface are controlled at the interferometer. If the number of the fringes on the back side is not acceptable, then, the slice is removed and molecular adhesion performed again. After the stacking of the 11 slices, the molecular adhesion broke progressively between the eleven slice stack and the reference cube on a small area in the angle opposite to the optical surface and the fringes of the top surface interferogram become circular which indicated an addition of the flatness errors of each slice⁵.

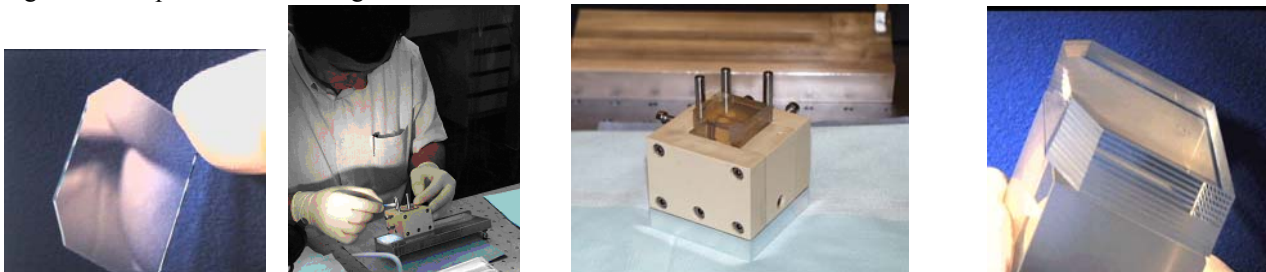


Figure 8 : Slice, Block slicer during stacking, Block slicer in this support with 3 reference cylinders, Stack of 11 assembled slices.

Once stacking is finished, tilts and curvature radius of the optical surface are checked at the profilometer (Figure 9-Left). Curvature radius is in agreement with its specification of 250 μm . On the other hand, tilts are not compliant with their initial specification of 15 arcsec but stayed inferior to 1 arcmin PTV except for slice n°16. In the same way, the back sides are controlled at the profilometer. Medium tilt around Y axis is better than 1 arcmin except for the slice n°16 reaching 8 arcmin. This error was finally due to an interpretation error of the interferogram during the last stacking (Figure 9-Right). We could then subtract errors on the back side with errors on the optical surface and determine true manufacturing errors on the slices. After subtraction, these average errors reach 1 arcmin for the angle around Y axis ⁶.



Figure 9 : Left: Profilometer view of all optical surfaces. Right: Profilometer view of back sides.

2.2 Fabrication and assembling of pupil mirrors

With the same manufacturing method (classical polishing), pupil mirrors have been made by CYBERNETIX. Using the profilometer, all individual pupil mirrors have been measured but due to the small dimensions of the measured mirrors, it is difficult to measure tilts and curvature radius. Tilts on the pupil mirrors are estimated to 2 arcmin ⁷. In a first time, the 10 tilted spherical mirrors were positioned and linked by molecular adhesion on a zerodur bar, but this method doesn't allow validating tilts and curvature radius on the pupil mirrors because of the small optical contact surface. In a second time, pupil mirrors were glued on the bar thanks to a comb retractable after assembling ⁸. The steps of the combs have been measured in tolerances by means of 3D metrology. Yet, this method has significantly improved performances ⁹.

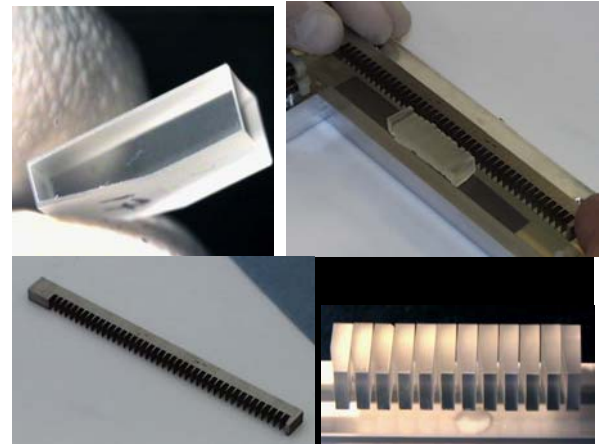


Figure 10 : Top: Pupil mirror - During assembling Bottom: Comb assembling tool- Back side of pupil mirrors.

| Parameters | Target Value | Tolerance |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Pupil mirror length | 3.042 mm | $\pm 35 \mu\text{m}$ |
| Pupil mirror height | 6 mm | $\pm 20 \mu\text{m}$ |
| Sphere position along X | Different according to slices | $\pm 6 \mu\text{m}$ |
| Sphere position along Y | Different according to slices | $\pm 6 \mu\text{m}$ |
| Sphere position along Z | Different according to slices | $\pm 100 \mu\text{m}$ |
| Curvature radius | 78.6 mm | $\pm 100 \mu\text{m}$ |
| Tilt around X | Different according to slices | $\pm 15 ''$ |
| Tilt around Y | Different according to slices | $\pm 15 ''$ |
| Surface flatness | | $\lambda/4$ |
| Faces parallelism | | $5''$ |

Table 2 : Tolerance budget pupil mirrors

The row of slit mirrors hasn't been manufactured because of lack of time and money. Moreover, dimensions and requirements of slit mirrors seem less critical than for the pupil mirrors. After a first checking (individual tests and assembling tests on the block slicer and row of pupil mirrors), we could start testing the image slicer on an optical bench at CRAL ¹⁰.

3. MEASURES IN THE PUPIL MIRRORS PLANE ²⁷

CRAL has recently developed an optical laboratory equipped with a laminar air flow hood (class 10000), a continuous ventilation, light lock and air conditioning. An optical bench has been mounted with different elements (Figure 11). In the first set of measurements, only the block slicer is present on the optical bench. The first measure consists in placing a CCD camera in the pupil mirrors plane. On the optical bench, a telescope simulator with a source, block slicer and a CCD camera are positioned. The Apogee CCD camera is composed of a matrix of 1536 by 1024 pixels and each pixel measures $9\text{ }\mu\text{m}$. The telescope simulator is composed of many elements. A rectangular aperture simulates a sky image. This aperture is reimaged on the block slicer and takes place at the focal plane of the first achromatic lens which serves as a collimator. In the collimated beam, we place a circular telescope pupil (3.5 mm diameter) and a monochromatic filter. A second lens reimages the rectangular aperture on the slicing mirror. A high-pressure mercury lamp provides the light. Because of a lack of space, a folding mirror is inserted between the block slicer and CCD camera. After that, the best focus is searched using a motorized translation stage along Z axis. For the alignment, we use a helium-neon laser. We put each element one after another and with certain degrees of freedom on each element, we can superimpose the incident beam with the reflected beam with the distance and angle respect as indicated on the Figure 11.

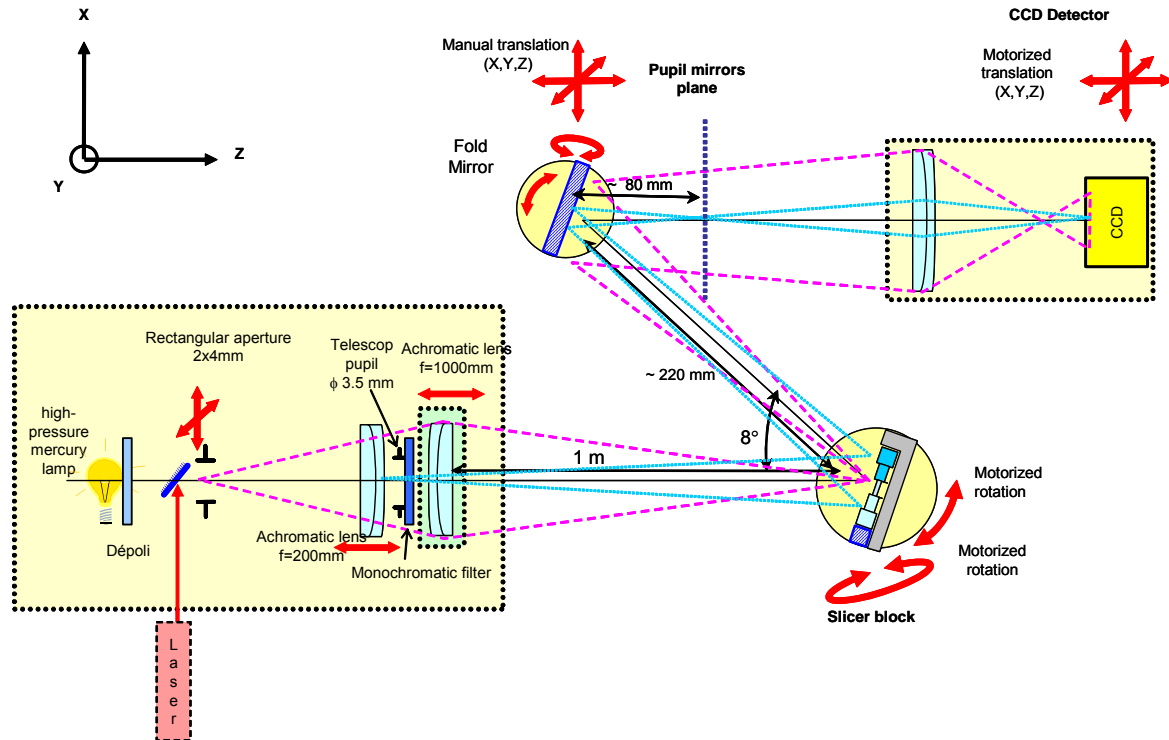


Figure 11 : Experimental set up for the measurement in pupil mirrors plane

When placing the CCD plane in the pupil mirrors plane, the pupil images are collected on the detector. Only 4 images can be observed in the same time. A translation stage along X axis allows observing 11 pupil images sequentially. Figure 12 represents the pupil line taken with a monochromatic filter at 365 nm. The images are calibrated with bias, dark and flat images in the good conditions.

After a long time for alignments and acquisitions, we determine various characteristics of this line such as pupil shape (diameter along X and Y axis), centroids, distance between two centroids, pupil relative positions, medium illuminance and its standard deviation on each pupil.

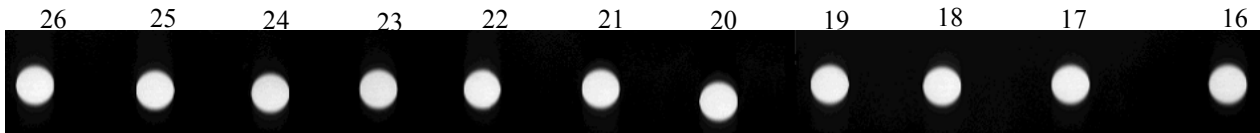


Figure 12 : Line of telescope pupil images

Slicing the pupil images along X and Y axes along the pupil centroid, we compare the shape of the curve with the diffraction simulation performed by means of an IDL program developed in house (Figure 13 and Figure 14). The FWHM is known to better than 2 pixels. The standard deviation between the experimental and simulated diameters along X and Y axes is smaller than 25 μm i.e. 2.5% and the shapes of the slice are similar to the simulated ones.

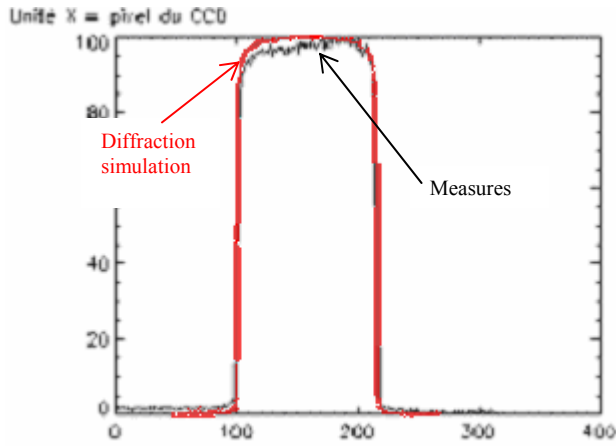


Figure 13 : Pupil image sliced along X axis

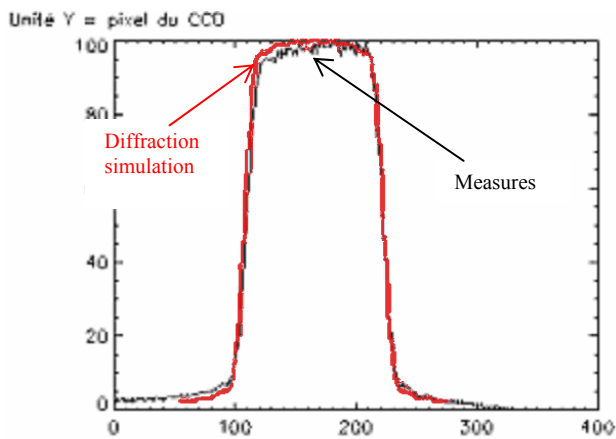


Figure 14 : Pupil image sliced along Y axis

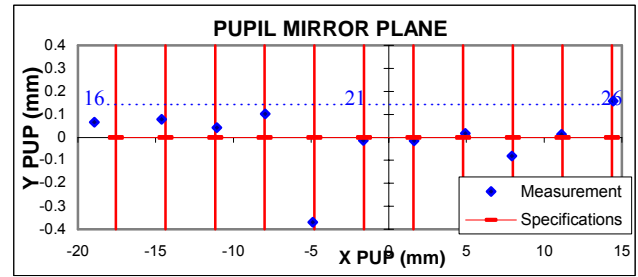


Figure 15: Centroid positions in the pupil mirror plane

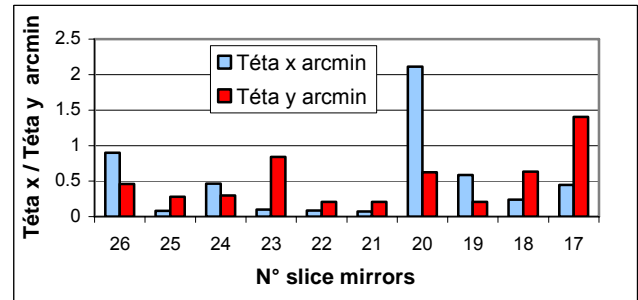


Figure 16 : Angular errors on the slices

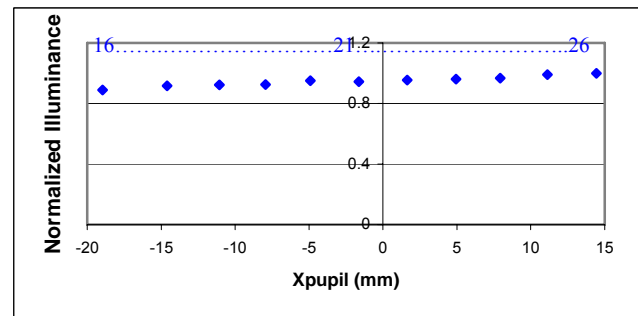


Figure 17 : Illuminance on each pupil

Along X axis, the relative positions in the pupil mirrors plane are better than 150 μm (conform to requirements) except for the slice n°16 owing to the error during stacking mentioned in § 2.1. Along Y axis, the positioning is better than 200 μm with a requirement going up 700 μm (Figure 15). After determining the relative positions, we deduce the angular errors on the slices and compare these errors with the profilometer measures during the individual tests. The angular errors on the X and Y angle are smaller 1 arcmin apart from the n°16 and n°17 around Y angle and the n°20 around X angle (Figure 16). Concerning the comparison with profilometer metrology, the two measures are similar but the experimental measures are slightly better than the profilometer data especially for the X position. Actually, the medium gap between these two measurements reaches 250 μm along X axis and only 100 μm along Y axis. The experimental results constitute one quantitative measure and the profilometer data give a qualitative and fast measure during stacking for the next prototypes. Nevertheless, regarding illuminance, we establish that the illuminance changes along the line can reach 20% (Figure 17) but the standard deviation on each pupil image represents 2 % of non uniformity. In spite of a lot of testings, the illuminance variation problem could not be corrected.

In conclusion, all slices (except for the slice n°16) are conforming to their requirements and in agreement with the last measurements.

4. MEASURES IN THE SLIT MIRRORS PLANE

4.1. Geometrical measures in the slit mirrors plane²⁸

After the characterization of the pupil images, we placed the row of 10 pupil mirrors on the optical bench. The lamp, telescope simulator and block slicer are the same and located in the same place. Because of pseudo-slit plane which is set close to the pupil mirrors, we use an imagery system composed of two achromatic lenses and a fold mirror. The first lens is just behind the pseudo-slit plane and the second lens is placed at the focal plane of the first lens (Figure 18). Moreover, when we change the position of the second lens, we change the magnification of the imagery system. The alignment of the experimental set up is long and complex.

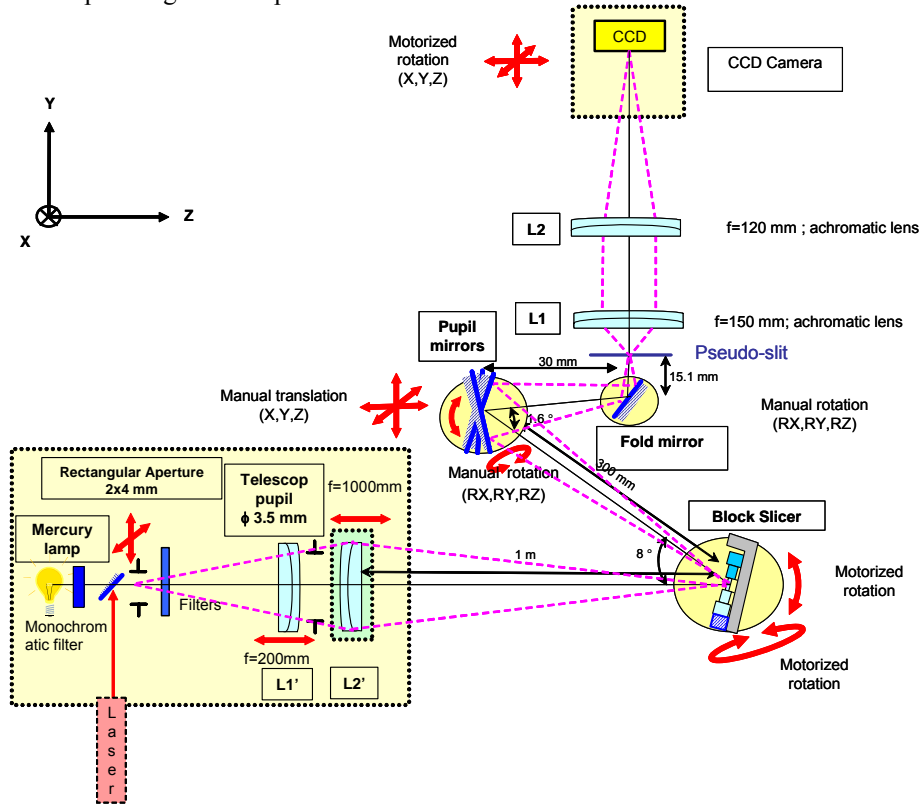


Figure 18 : Experimental set up for the measurement in slit mirrors plane

In placing correctly the second lens, we can get two slits on the CCD detector instead of four. The Figure 19 represents the reconstructed pseudo slit with 10 slits.

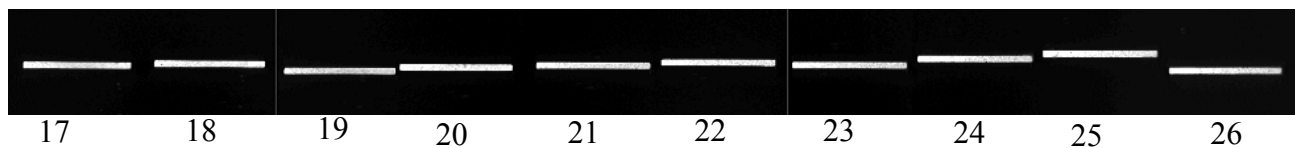


Figure 19 : Pseudo slit

All measurements were made at 365 nm and the images were calibrated. In placing a hole with the known size in the slit mirrors plane, we calibrate the exit module which is composed of the two lenses and the CCD camera. After that, we deduce the magnification of the exit system and determine several characteristics on the pseudo slit.

In slicing one mini slit along X and Y axes, we see the shape of the slit and compare with our diffraction simulation software (Figure 20 and Figure 22). Within the line of mini slits, we compute these relative positionings and deduce the angular errors of the pupil mirrors (Figure 21 and Figure 23). The centroid positions along X axis are conformed to their requirements (100μm) except for the mini slit n°20 which almost overlap with the mini slit n°19. Moreover, along Y

axis, all images are below their specifications ($<100\mu\text{m}$) excepted the mini slits n°26 and n°25. These errors are the result of detachment during cleaning of the pupil mirrors with an air bomb. Nevertheless, the angular errors are greater than requirements (± 1 arcmin). In fact, they are around ± 1.5 arcmin along Y axis and ± 1.2 arcmin around X apart from the pupil mirror n°26 and n°25 around Y angle and the number 20 around X angle.

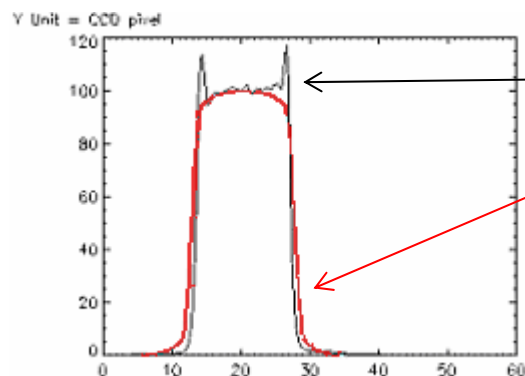


Figure 20 : Mini slit sliced along Y axis

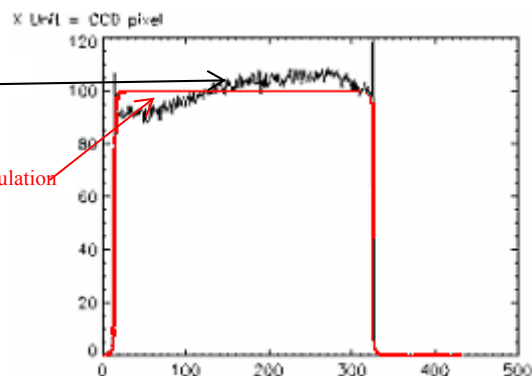


Figure 22 : Mini slit sliced along X axis

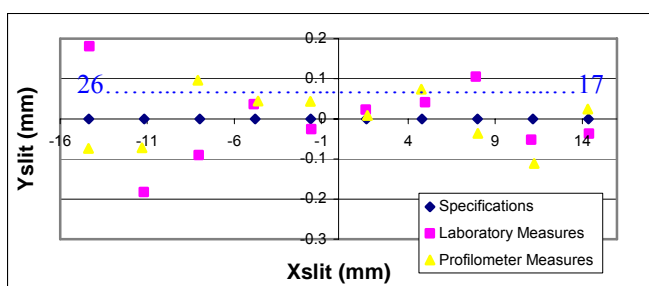


Figure 21 : Centroid positions in the slit mirrors plane

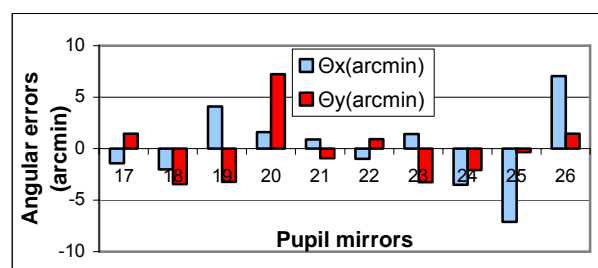


Figure 23 : Angular errors on the pupil mirrors

In changing configuration (use microscopic lens magnification by 4 instead of two achromatic lenses), only one mini slit is reimaged on CCD camera. We calculate the length, the width and estimated the distortion. There is no distortion along one mini slit. We compare our measurements with Zemax simulation and our IDL diffraction software. The medium length is close to the theoretical value that is 0.5 CCD pixels. The length of the slices slightly differ one from another nevertheless all the slice lengths are compliant with their specifications. The width is smaller than theoretical value (1.5 pixels). The slice widths are in accordance with their specifications, but measure accuracy is of 1 pixel and this sampling is not enough high. Moreover, because of some dusts on the slicer, the photometric quality is no regular in particular on the edges (Figure 20 and Figure 22).

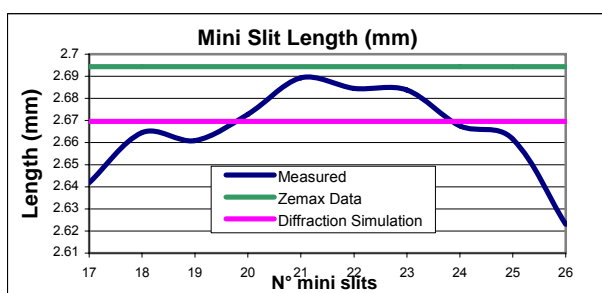


Figure 24 : Mini slit length

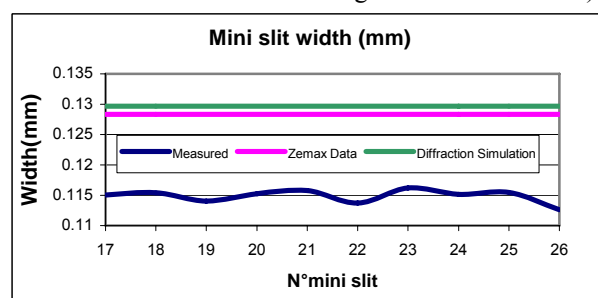


Figure 25 : Mini slit width

In conclusion, geometric and photometric data are correct. With several difficulties, this prototype constitutes the first prototype with spherical tilted slices in zerodur without overlapping of the mini slits. This prototype should be installed as an instrument on a telescope.

4.2. PSF measures in the slit mirrors plane ²⁹

Using the same configuration that for the geometrical measurements with a microscopic lens with a magnification of 4, we searched for good focus on the pseudo slit. Once focus found, we replace microscopic lens with a magnification of 4 by a magnification of 25 and the rectangular aperture by a pinhole with a diameter of $100\text{ }\mu\text{m}$. We reimage this pinhole on the centre of the block slicer exactly in the middle of the slice n°22. After that, we adjust image with the centre of the CCD camera. We shift the pinhole with a pinhole of $10\text{ }\mu\text{m}$ in the capacity of observing the PSF (Figure 26).

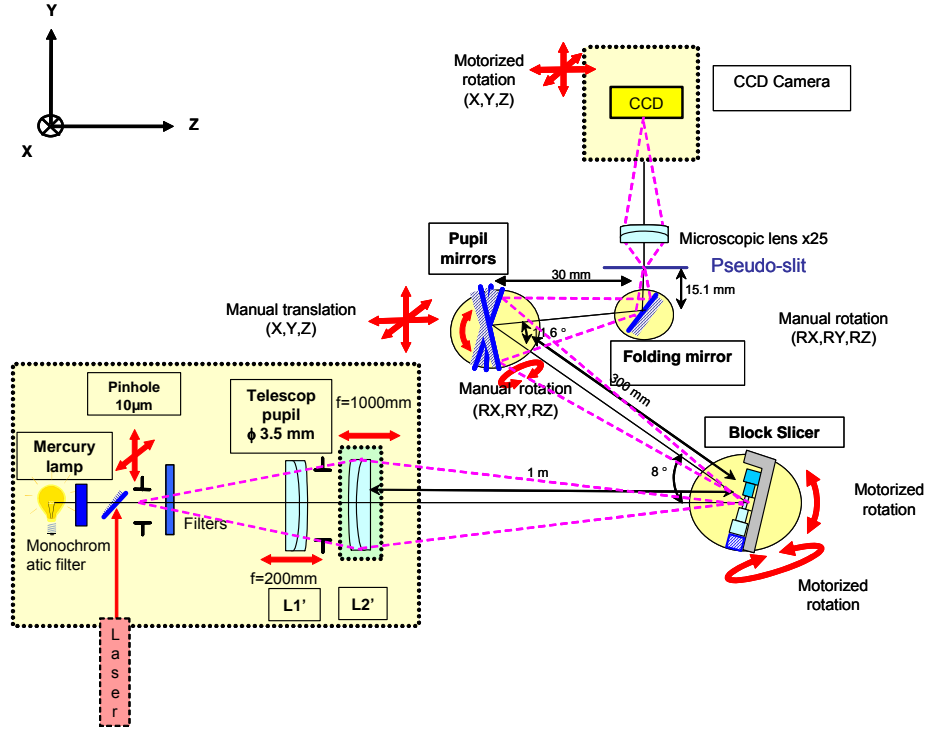


Figure 26 : Optical bench of the experimental set up for the PSF measurement

In the first time, we always centre PSF along the Y axis on the slice but we put off the centre along X axis. Nine measurements have been made on the block slicer following the Figure 27. All the PSF measurements are made with a monochromatic filter at 578 nm , a pinhole with a diameter of $10\text{ }\mu\text{m}$ and a very long time exposure (600 seconds). Because of this exposure time, the noise is high and it's difficult to establish with high accuracy the second and third Airy rings. On the Figure 28, we can see a PSF centred along X and Y axis on the slice n°22 with the first, second and third Airy rings. The Figure 29 shows the 3D shape of the PSF. For all PSF measurements, the FWHM is very close to the simulate value with a diameter of $23\text{ }\mu\text{m}$ against $25\text{ }\mu\text{m}$ with our simulation diffraction software (Figure 30). Moreover, there is 80% of encircled energy in the medium circle with a diameter of $66.5\text{ }\mu\text{m}$ corresponding to one spatial sampling element of the NIRSpec IFU (Figure 31).

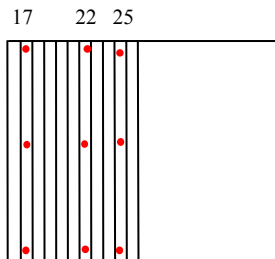


Figure 27: PSF on the slicer

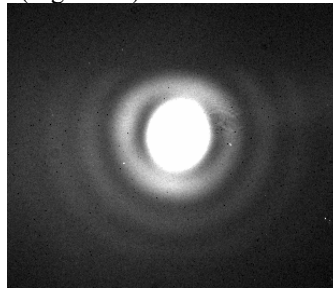


Figure 28 : PSF Image

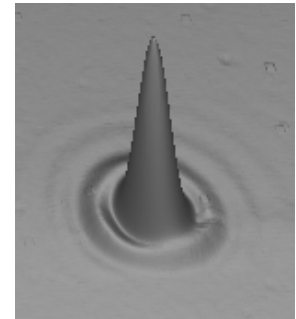


Figure 29 : 3D shape for the PSF

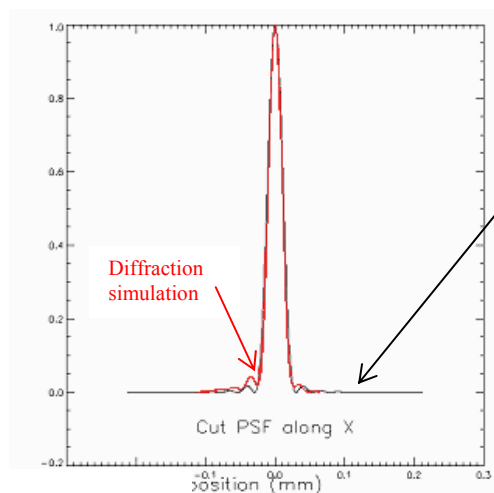


Figure 30 : PSF slice along X axis (simulated and measured)

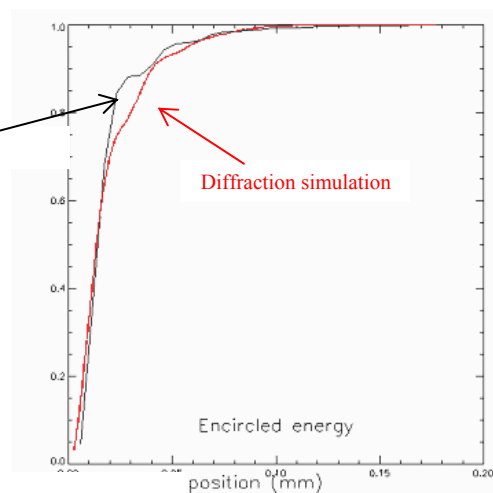


Figure 31 : Encircled energy curve (simulated and measured)

After the analysis of the individual PSF, we image the pinhole between two slices, i.e. decentred along Y axis. The CCD camera takes an exposure of two parts of the PSF. Moreover, we take an exposure of the mini slit corresponding to the two parts of the PSF allowing knowing exactly the gap between the sliced PSF. Thanks to our simulation diffraction software, we reconstruct the PSF. By means of this image, we slide the PSF along Y axis and determine the encircled energy curve and compare with the simulated curve. The Figure 32 and Figure 33 represent both parts of the PSF: one on the slice n°22 and the other on the slice n°23. We see up to the fourth Airy ring.

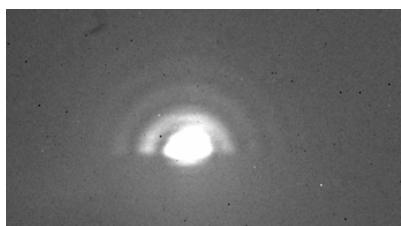


Figure 32 : Upper part of the sliced PSF

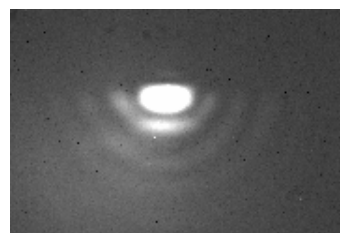


Figure 33 : Lower part of the sliced PSF

The major difficulty is to correctly rejoin the two parts by software. With knowledge of the relative position slits, in subtracting noise, we reconstruct the PSF (Figure 34). We superimpose the simulated and measured curves for the encircled energy and for the sliced PSF along Y axis (Figure 35 and Figure 36). We have 80% encircled energy in a circle with a diameter of 56 μm in agree with requirements and a FWHM which measures 23 μm .

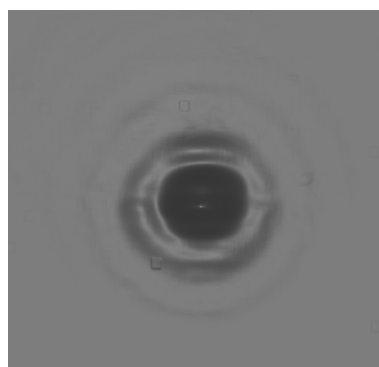


Figure 34 : Rebuilt PSF

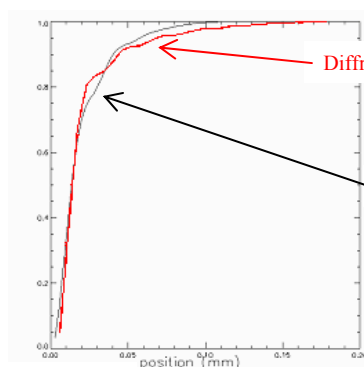


Figure 35 : Encircled Energy

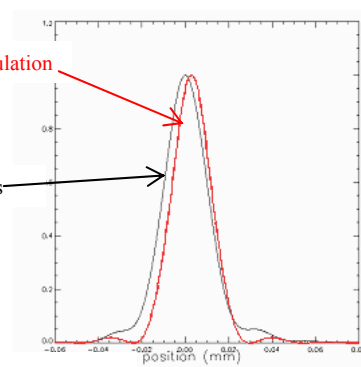


Figure 36 : Slice along Y axis

In conclusion, the image slicer quality is very good for the two criteria whatever the PSF is slice or not.

5. CONCLUSION

With this mini prototype, we have proved the interest of this high-precision process for the manufacturing of Image Slicer. This prototype is the first prototype made of zerodur and with spherical tilted optical elements. In spite of risked fabrication with tight tolerances, small surfaces and an original assembling method by molecular adhesion, the fabrication is correct. The set up of an optical bench is complex and long. The first measurement in the pupil mirrors plane allows validating the angular tilts on the slice and the magnification of the slicer. The second measure consists in the capture of the pseudo slit. There is no cross-talk and an acceptable alignment. The last measure shows the high image quality of this image slicer. All requirements have been checked and validated either individually or on an optical bench. This Image Slicer could be used as an instrument on a telescope. These results are very encouraging and it's for these reasons that a consortium led by LAM, CRAL and University of Durham has decided to manufacture a new prototype based on the optical design of the IFS for the JWST in the frame of an ESA contract. This prototype will be composed of a stack of 22 dummy slices and 8 active slices, a row of 5 pupil and slit mirrors mounted in the same mechanical structure (Figure 37). The CRAL will be in charge of tests at

room temperature and in the visible of this ESA prototype¹⁴.

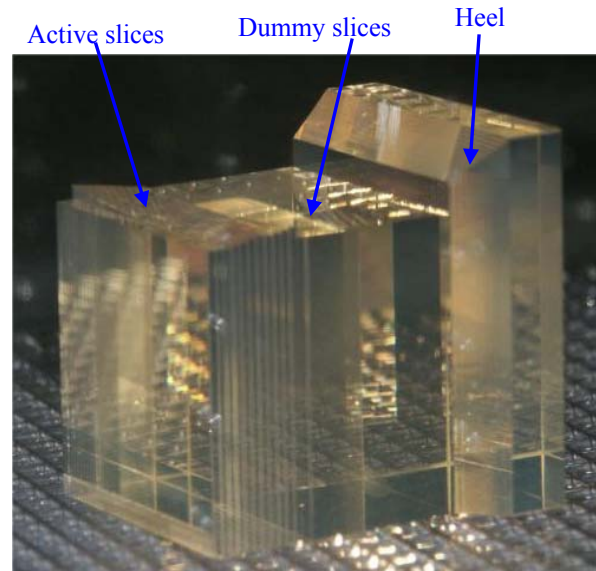


Figure 37 : The stack of slices for the ESA prototype

REFERENCES

1. E. Prieto and al., "Great opportunity for the NGST-NIRSPEC : a high-resolution integral field unit", SPIE Proc., 4850, 2002
2. R. Content, "A new design for integral field spectroscopy with 8-m telescope", SPIE vol. 2871, p. 1295, 1996
3. C. Bonneville, E. Prieto, F. Henault, P. Ferruit, J.P. Lemonnier, F. Prost, R. Bacon, O. Le Fevre, "Design, prototypes and performances of an image slicer system for integral field spectroscopy", SPIE Proc., 4842, 2002
4. F. Laurent, "Recette des miroirs-slice individuels", CRAL internal report n° SLI-MEM-TEC-005
5. F. Laurent, "Assemblage du bloc slicer", CRAL internal report n° SLI-MEM-TEC-006
6. F. Laurent, "Recette de contrôle des faces arrière et latérales du bloc slicer", CRAL internal report n° SLI-MEM-TEC-007
7. F. Hénault, "Recette des miroirs-pupille individuels", CRAL internal report n° SLI-MEM-TEC-001
8. F. Hénault, "Assemblage de la barrette des miroirs-pupille", CRAL internal report n° SLI-MEM-TEC-002
9. F. Hénault, "Test de la barrette des miroirs-pupille collés", CRAL internal report n° SLI-MEM-TEC-003
10. F. Hénault, "IFU mini-breadboard test plan", CRAL internal report n° SLI-MEM-TEC-004
11. F. Laurent, "Compte Rendu de tests dans le plan des miroirs pupille", CRAL internal report n° OPT-MEM-TEC-001/2003
12. F. Laurent, "Compte Rendu des tests dans le plan des miroirs fente", CRAL internal report n° OPT-MEM-TEC-010/2003
13. F. Laurent, "Compte Rendu des tests dans le plan des miroirs fente pour la mesure de PSF", CRAL internal report n° OPT-MEM-TEC-017/2003
14. C. Macaire and F. Laurent, "Image Slicer Prototype Test Plan", LAM internal report n° LAM/OPT/SLI/RPT/0038

Designing, manufacturing and testing of an advanced image slicer prototype for the James Webb Space Telescope

Florence Laurent^{a, b}, Charles Macaire^c, Pierre-Eric Blanc^c, Eric Prieto^c, Gabriel Moreaux^c,
Daniel Robert^a, Pierre Ferruit^a, Christophe Bonneville^b, François Hénault^a,
David Robertson^d, Juergen Schmoll^d.

^a CRAL - Observatoire de Lyon, 9, Avenue Charles André, 69230 Saint-Genis-Laval, France

^b CYBERNETIX SA, Rue Albert Einstein BP 94, 13382 Marseille, France

^c LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Traverse du Siphon, 13376 Marseille, France

^d University of Durham, Physics Department, Durham DH13LE, UK

ABSTRACT

In the frame of an European Space Agency (ESA) contract, a consortium of three European research institutes (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Centre de Recherche Astronomique de Lyon and the University of Durham) and the Cybernetix company have designed, manufactured and tested a prototype of an Integral Field Unit (IFU) for the NIRSpec instrument of the future James Webb Space Telescope (JWST). After a brief presentation of the optical design of this prototype, which is based on the advanced slicer concept, we will focus on the optical tests of this prototype. We will first present the tests performed at LAM on the individual optical elements prior to their integration in the mechanical structure, as well as the alignment tests conducted as part of the integration procedure. We will then describe the tests and their results in the visible of the complete IFU system both at room temperature (tests performed at CRAL) and at operating temperature (30 K, tests performed at the University of Durham). Briefly, these tests included: measurements of the characteristics (position, shape, size...) of the pseudo-slit of the IFU prototype; measurement of the point-spread-function at different locations within its field of view; and measurement of the position, shape and size of the exit pupils. Last, we will conclude on the TRL6 readiness of the advanced image slicer technique and we will provide a glimpse of how wide-spread this technique is becoming both for ground- and space-based applications.

Keywords: Integral Field Spectroscopy, Advanced Image Slicer, Cryogenic environment, NIRSpec, JWST

1. OPTICAL DESIGN AND CHARACTERISTICS ⁴

The European Space Agency (ESA) has the responsibility of the manufacturing of the near-infrared spectrograph NIRSpec of the future James Webb Space Telescope (JWST). The baseline concept for this instrument is a wide-field multi-object spectrograph (MOS) using a fully addressable micro-shutter array for target selection. However, an early, ESA-funded European study, IFMOS⁹, had shown the interest of a wide-field, integral-field spectrograph concept based of the advanced image slicer technique² for this instrument. This concept was therefore kept as a backup by ESA, triggering the launch in 2002 of a study aiming at developing a prototype of such an advanced image slicer and at demonstrating its feasibility and technical readiness for space-based, cryogenic applications. The contract for this "ESA prototype" was awarded to a consortium led by LAM (PI: E. Prieto) and including two other institutes: the Centre de Recherche Astronomique de Lyon (CRAL) and the University of Durham.

Optical Design of the ESA prototype ^{2,5}

The baseline for the optical design of the ESA prototype was the design of IFMOS instrument. This latter had a 40" x 40" field of view sampled at 0.2" and covered the 1.0-5.0 μm domain at a spectral resolution around 100. To achieve this, the IFMOS included four identical spectrographs, each using a pair of 30 slicing-mirror stacks to literally slice the input field of view and rearrange the input image into two exit slits at the entrance of the spectrograph. These "stacks" were followed by lines of pupil and slit mirrors. A sketch of this concept is shown in the Figure 38.

As the goal was demonstrate the feasibility and technical readiness of the advanced image slicer concept, the ESA prototype did include only the integral field unit (i.e. no fore-optics and no spectrograph). Due to funding and schedule limitations, it was decided that the prototype would include a single stack (instead of two in the original IFMOS design) of 30 ZERODUR slicing mirrors assembled using optical-bonding technique.

Only 10 slicing mirrors out of 30 would be optically active. The 20 non-active slices (termed dummy) were representative enough to validate the stacking process but were to have planar instead of spherical surfaces. In contrast with the concept of the slicing-mirror stack, where each slice is manufactured independently and stack is assembled by optical contact, it was first foreseen to have "monolithic" designs for the lines of pupil- and slit-mirrors (diamond turning technique). However, it turned out that this technique was not mature enough (poor surface roughness quality) and that manufacturing was not possible within time. It was therefore decided in the course of the study to switch back to the backup, "non-monolithic" approach based on optical bonding of individual mirrors. Due to schedule and funding contingencies, these lines did include only five mirrors each.

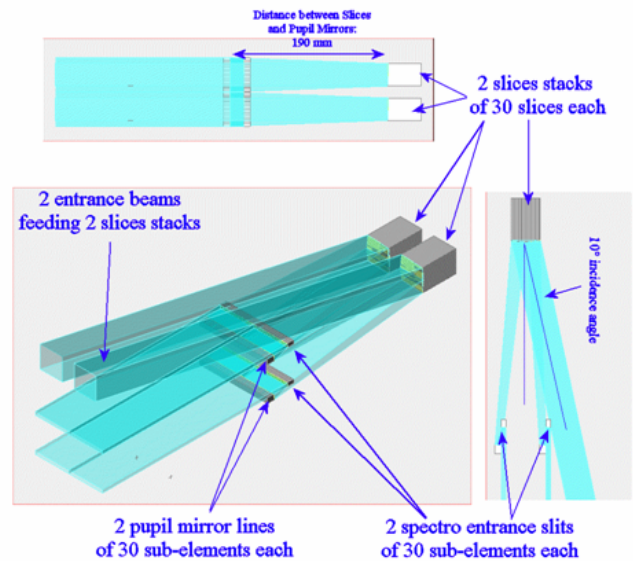


Figure 38 : Left: Sketch of the ESA IFMOS instrument.

Characteristics of the optical sub-systems and of the mechanical structure

The mechanical structure and the optical elements made of Zerodur were manufactured by Cybernetix¹⁸. The telescope pupil is located at 150 mm of the slicer, it is represented by a spherical mirror ($R=299$ mm) with an elliptical mask glued on its surface. The mask has a diameter of 1.3 mm along y axis and 2.6 mm along x axis. The slicing mirror stack is made of: 20 dummy slices with planar surfaces (bottom slices); 10 active slices with tilted spherical surfaces (top slices), and a heel which supports the stack (Figure 39). Each individual slice is 0.9 mm thick and 27 mm long. All slices have the same curvature radius (151.1 mm) but they have different orientations (tilts), i.e. their curvature centres are offset along two orthogonal x- and y-axes (perpendicular to the optical axis). All the slices have the same curvature radius of 151.1 mm. Because all slices share the same radius of curvature, the pupil mirrors are located on a semicircle along the z-axis (optical axis). Each pupil mirror has the same curvature radius of 24.85 mm and different tilts and measures 4 mm x 2.754 mm. The five pupil mirrors are hold by optical contact between two zerodur bars and on another zerodur bar placed below the pupil mirror line (Figure 40). During the transportation, one pupil mirror was seriously damaged. The slit-mirror line is similar in design to the pupil-mirror one. They differ by the size of the mirrors (3mm x 2.754 mm), their curvature radius (23.8 mm), and the fact that they all have the same orientations (for cost reasons).

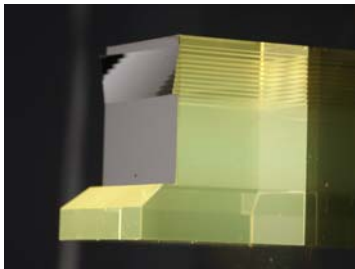


Figure 39 : The slicer

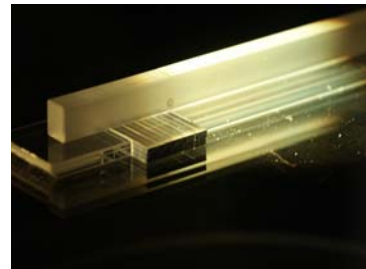


Figure 40 : The pupil mirror line

The mechanical design is composed of two perpendicular structures: the main structure and the sub-structure which holds the pupil and slit mirror lines (Figure 41). The substructure is made of invar M93. All optical elements are held with clamping and steel cylinders.

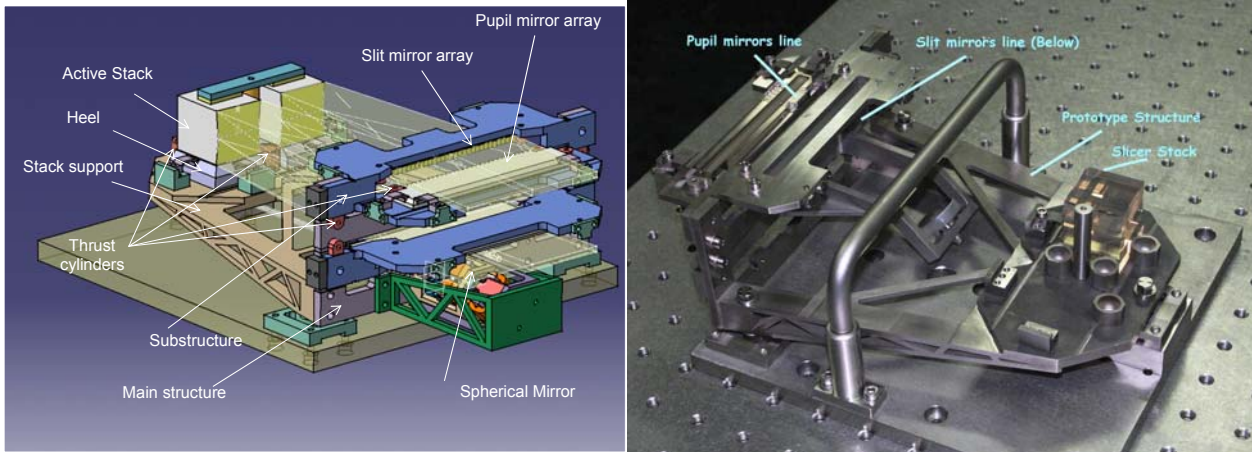


Figure 41 : Left: 3D mechanical drawing of the opto-mechanical design. Right: Complete ESA prototype

The mechanical structure and optical elements have been controlled by different means detailed in the next paragraph.

2. INTEGRATION TESTS⁷

2.1. Mechanical structure tests

During the integration, the mechanical structure was checked using a Coordinates Measurement Machine (CMM) at LAM. In a first step, the reference trihedron of the coordinates system (the slicer stack) was checked. In a second step, the orthogonality default between the main structure and the plane of the reference trihedron was measured and corrected thanks to the insertion of spacers. The same procedure was applied to the substructure. In a third step, the position of the pupil and slit mirrors lines was calculated. To compensate the location default, the spacers of different thicknesses were placed between the mirror line and the thrust cylinders and between the clamp and the thrust structure (Figure 42). Thanks to this technique, the mechanical structure was made compliant with its alignment specifications.

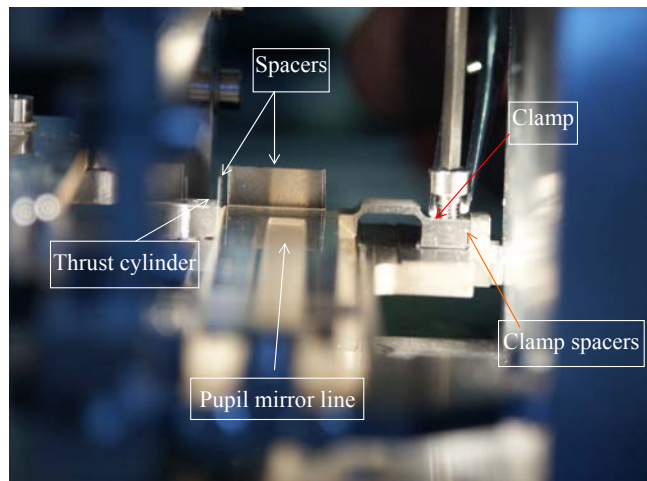


Figure 42 : Location of the spacers

2.2. Optic tests

All optical sub-systems were controlled with the profile projector machine aiming at checking the overall size and shape of the elements. The slicer, pupil and slit mirrors lines and the elliptical aperture were all compliant with their specifications. After, the orientations (tilts) of the individual mirrors were checked. The surface of the mirrors with a STIL measurement machine (profilometer) was mapped. Then, with a dedicated software, a spherical surface was fit to the measured mirror surfaces allowing to determine the location of the centre of curvature of each mirror (Figure 43).

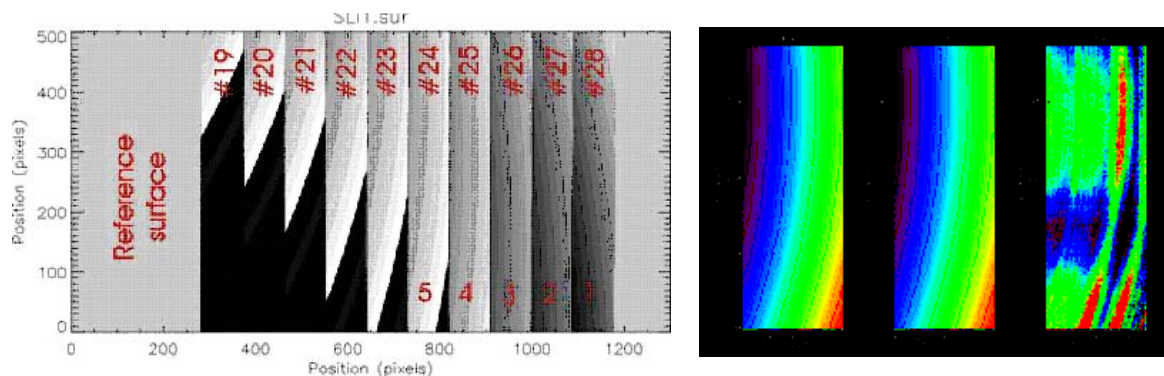


Figure 43 : Data processing for the slices orientation measurement

Comparing these results with the measured tilts of the back surface of the mirrors, we were able to disentangle positioning errors due to the manufacturing and assembly. The positioning errors are within $\pm 22 \mu\text{m}$ along x axis and $\pm 23 \mu\text{m}$ along y axis. We are marginally non-compliant with the required specification of $\pm 20 \mu\text{m}$. In scanning the back and lateral surfaces of the block slicer, the positioning error during the pilling by optical contact is determined. This error is negligible with a maximum of $\pm 5 \text{ arcsec}$ ($\pm 3.33 \mu\text{m}$), showing that the errors are given by the manufacturing process. With the same method, the surface of the pupil and slit mirrors are scanned. Damages which occurred during transportation can clearly be seen on the last mirror to the right. Concerning the pupil mirror tilts, the positioning error along both directions is inferior to $\pm 6 \mu\text{m}$ for a required position of $\pm 20 \mu\text{m}$. The same type of results is obtained for the slit mirrors ($\pm 7 \mu\text{m}$).

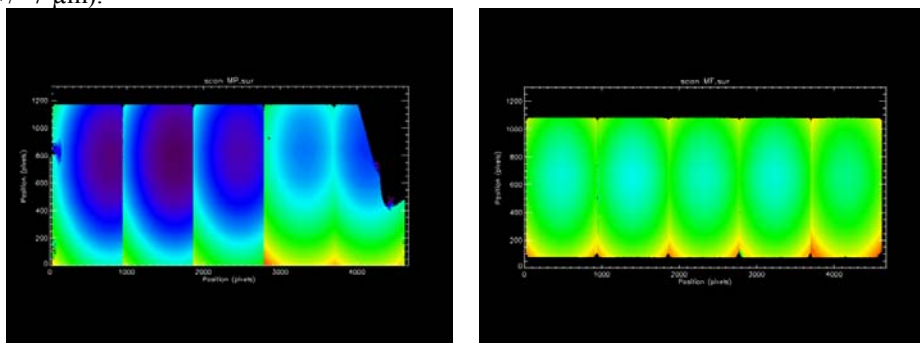


Figure 44 : Left: Data treatment for the pupil mirrors tilts. Right: Data treatment for the slit mirrors tilts

The STIL machine measurements are compared with that of a second independent method. An optical bench for the measurements of the mirror curvature centres is mounted. Each mirror (slice, pupil, slit) makes an image of the reticule at its focal plane (Figure 45). The shift of the measured location of the reticule with respect to its nominal one corresponds to half of the error on the curvature centre position.

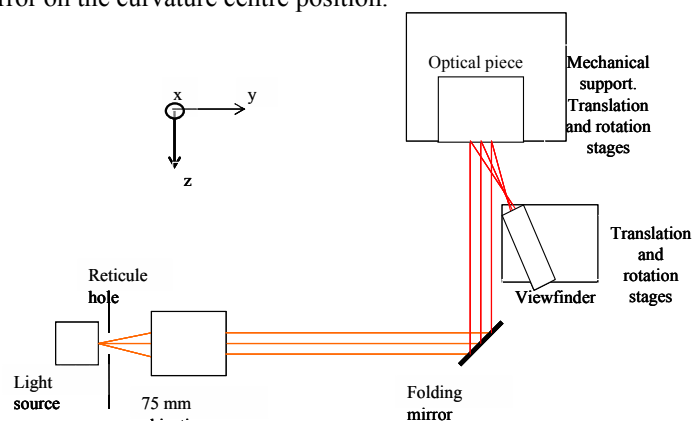


Figure 45 : Optical bench for the measurement of the tilts on the slicer

These yields positioning errors along the two axes perpendicular to the optical axis of: $\pm 40 \mu\text{m}$ for the slicing mirrors; $\pm 5 \mu\text{m}$ for the pupil mirrors; and $\pm 5 \mu\text{m}$ for the slit mirrors. The comparison between the results of the profilometer and the data of the optical bench is quite similar but the latter are less reliable because of poorest measurement accuracy. The last tests is actually part of the integration procedure of the prototype and aims at both centring correctly the input pupil (which corresponds to the pupil mask on the re-imaging mirror) and once more measuring relative orientation errors of the slicing mirrors (by measuring the relative positions of the individual pupils). For this purpose, the stack is uniformly illuminated. The slit mirrors are replaced by a folding mirror. The detection module re-images the pupil mirror plane on the detector (Figure 46).

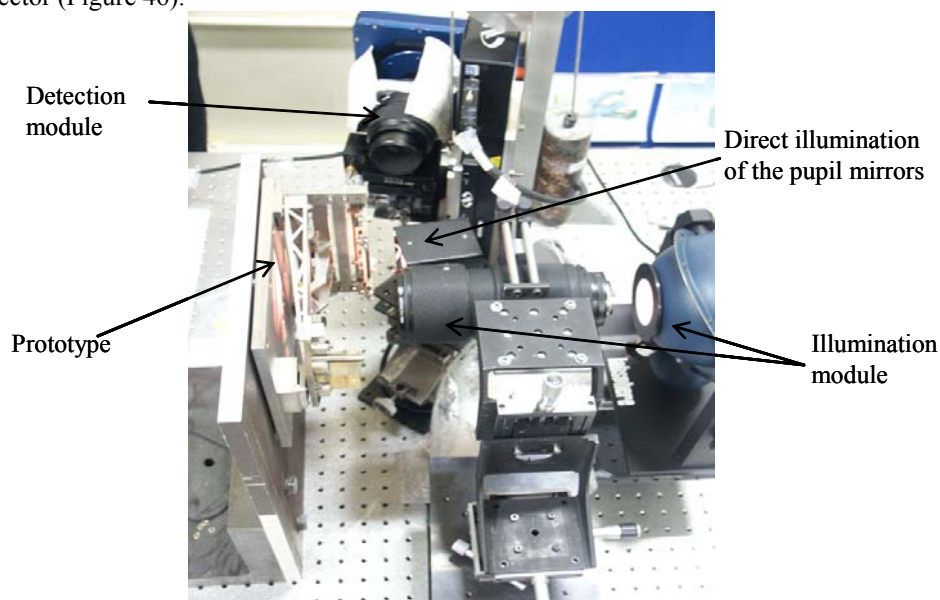


Figure 46 : Optical bench for the integration test in the pupil mirror plane

A fibre light illuminates the pupil mirrors (Figure 47). Thanks to a dedicated software, the position of the pupil images on the pupil mirrors is analysed. The centring error is $\pm 39 \mu\text{m}$ along x axis, between -105 and $-58 \mu\text{m}$ along y axis that is to say $\pm 40 \mu\text{m}$ in relative default.

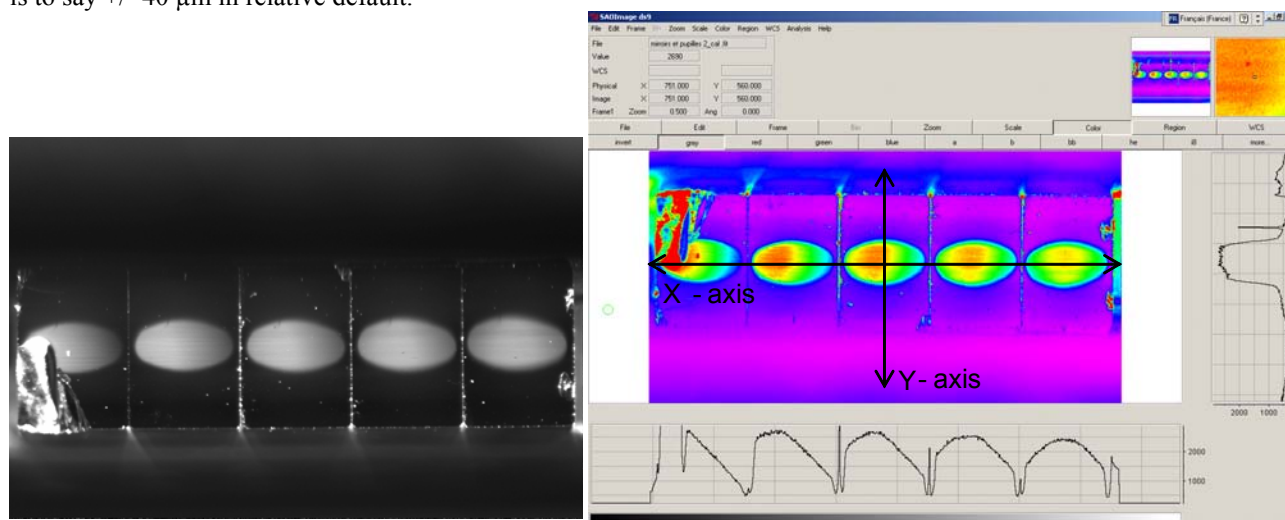


Figure 47 : Pupil images on the pupil mirrors with a slice along x and y axes

At this stage, the tests of the individual optical elements as well as the integrations tests have proved successful and the system-level, room-temperature and visible tests could start at CRAL.

3. VISIBLE TESTS AT ROOM TEMPERATURE^{7,9}

These tests were carried out in the optical laboratory at CRAL and followed the following test plan⁸.

3.1. General view and set up

The optical bench is composed of three independent modules (Figure 48). The first module is an illumination module included an integrating sphere, different spectral filters, a collimator lens which images the diaphragm on the slicer and a diaphragm (a rectangular aperture and a grid of holes for PSF measurements) located in the focal plane of the collimator. These elements are mounted on the same rail with different degrees of freedom for each optical component. The second module is the slicer prototype module mounted on two rotation stages around x and y axes which provide a correct alignment. The detection module is composed of a camera lens with a chosen magnification according to the test which images the correct plane on the detector.

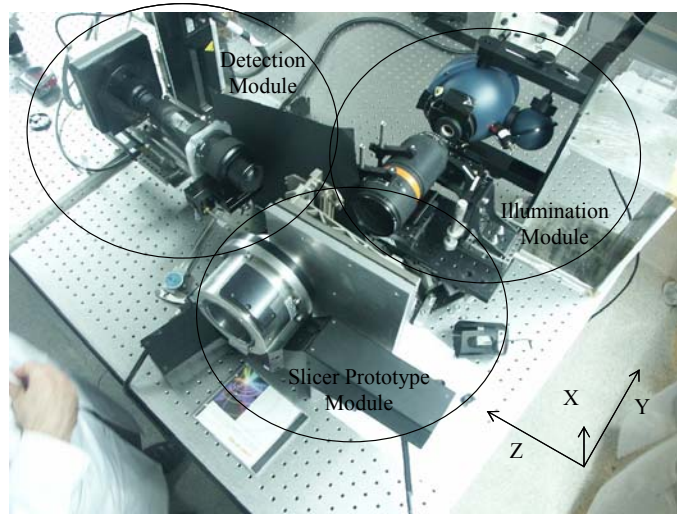


Figure 48 : General view of the optical bench

Once the three modules independently aligned thanks to the stages located on the elements, they are aligned with respect to each other thanks to their global orientations movements. The auto collimation method is used for the alignment. By illuminating the prototype slicer module backwards with a laser beam which hits the central slit mirror, the slit mirror focuses the beam on the pupil mirror which images it on the slicer. On the re-imaging mirror, we have a point-like source and the slices are re-imaged at the infinity on a wall. A second laser beam is placed on the centre of these images. For a correct alignment, we checked that the entrance laser which images the exit pupil at the infinity hits the exit laser at the centre (Figure 49).

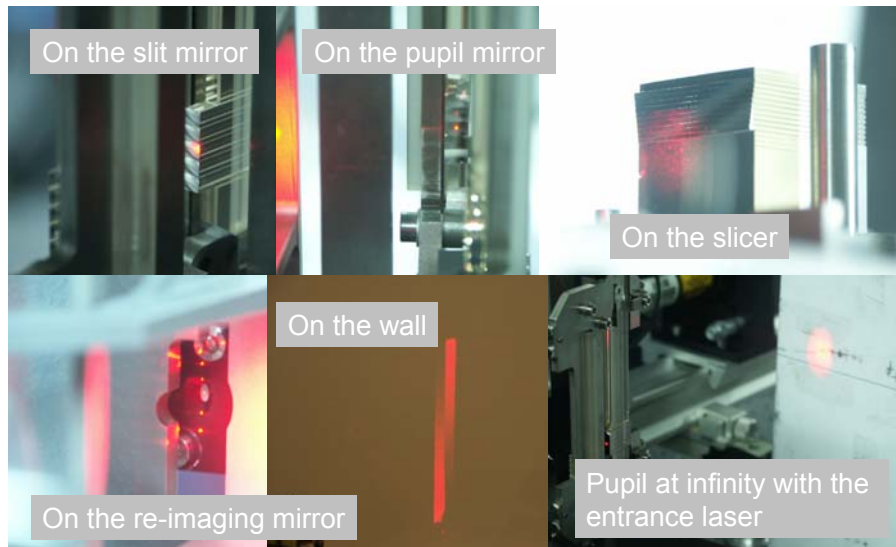


Figure 49 : Steps of the global alignment

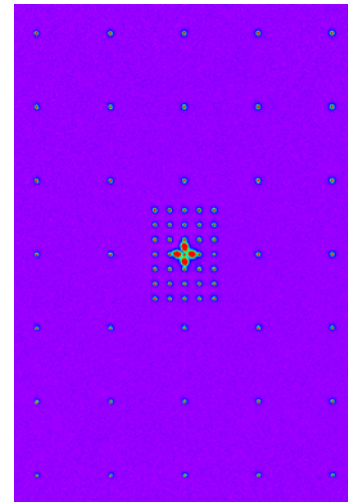


Figure 50 : Calibration Grid

The illumination and detection modules are calibrated for each test. A calibration grid is placed at the object plane of the modules and it is imaged on the detector. Then, the magnification and the distortion of the modules are known (Figure 50). Once the calibration and alignment are made, the warm tests can start.

3.2. Relative location of pseudo-slit

This test consists in the observation of the five mini-slits simultaneously. The integrating sphere is put just near the folding mirror without collimator lens. A short-pass filter with a cut-off wavelength of 600 nm is used. For the detection module, a camera lens with a magnification by one is used. On the detector, five images of the slices are observed. After that, the pseudo-slit plane in focus with a step of 50 μm is scanned. By determining the best focus, the relative and absolute positioning of the pseudo-slit are measured and had a correct estimation of the size and shape of the slits (Figure 51). The slits are not very well centred on their mirrors. In fact, during integration, a compromise has been made between the accuracy of the centring and the number of alignment iterations, to minimize the risk of damaging the mirrors during their manipulations. We have a global mean gap of 15 μm on the right of the mirrors. The relative positioning along x axis is less than 6 μm for the specification of ± 50 μm . Moreover, the relative positioning along y axis is between ± 9 μm (± 50 μm for the specification).

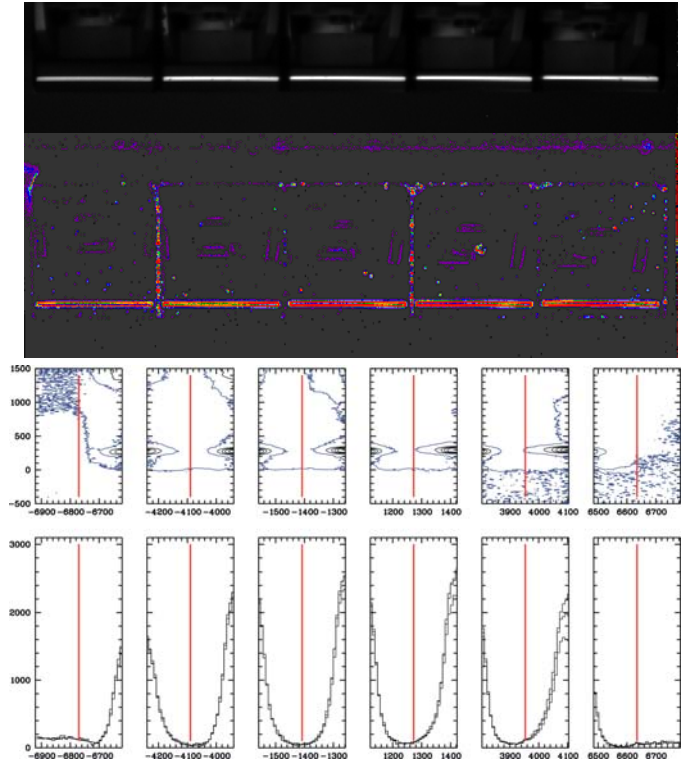


Figure 51 : The five pseudo-slits in the slit mirrors plane

3.3. Size and shape of mini-slit

With the same illumination module than for in the last test and with the detection module slightly different (a microscopic objective by 5 is associated with the camera lens with the magnification by 1), each slit is observed individually. With this configuration, we have a high precision measurement along y axis. Because of the important stray light level, the length along x axis has not been evaluated. An exposure of the pseudo slit on the slit mirror n°22 is given on the Figure 52. The overall tilt of the slit is due to a slight tilt of the CCD camera.

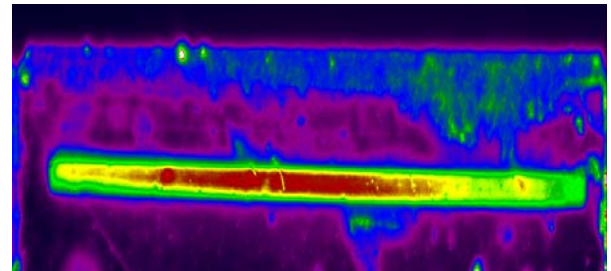


Figure 52 : Mini-slit on the slit mirror 22

The average location along y axis of the pseudo slit centres is 328 μm from the slit mirror lower edge. Theoretically, the centre is located at 200 μm . The centring relative default in y direction is between -8 and +12 μm . It is conform to the specification of ± 50 μm . The mini slit mean width is 74.3 μm . It is lower than the specification of 80 ± 1.6 μm .

3.4. PSF measurements

The PSF measurements allow to better evaluate the image quality of the slice-slit imagery realised by the pupil mirrors. For that, the illumination module is changed. The collimator lens is inserted and the calibration grid is placed on rotation and translation stages in its focal plane. The prototype is illuminated with the integrating sphere and the exposures are taken with two filters: one at 577 nm and another at 925 nm. With this configuration, we have a set of PSFs which covers the 2 out of 3 of the slice length. The detection module is the same as the previous test. This illumination and the detection module are calibrated for each wavelength. For each slice, two series of six PSFs are observed at the extremities of the slice image. The presented results concern the slice-slit imagery n°21. On the Figure 53, the square represents the area of 80 % encircled energy.

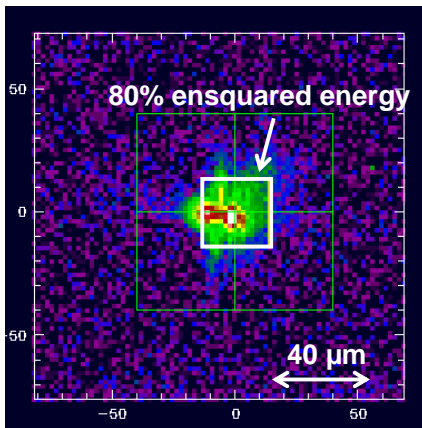


Figure 53 : PSF on the slit mirror 21

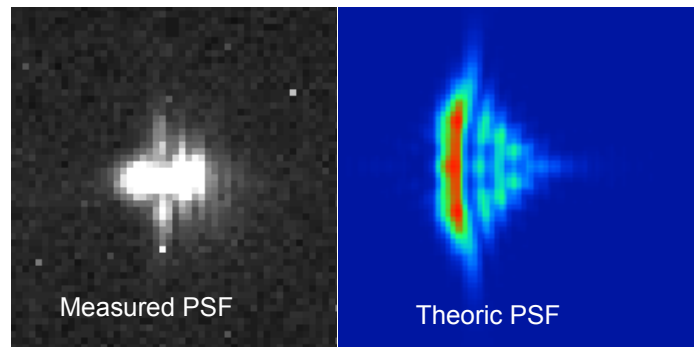


Figure 54 : Comparison between theoretic and measured PSF

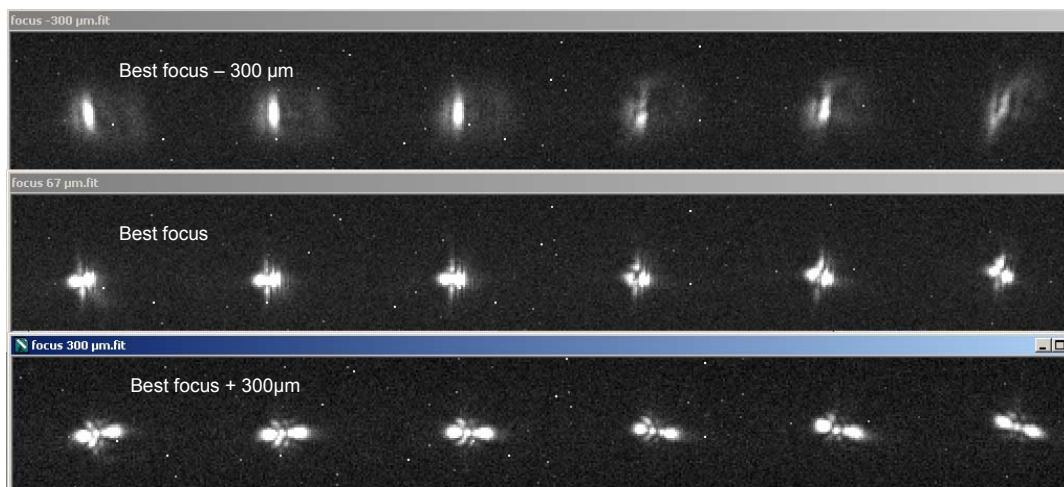


Figure 55 : PSFs on the slit mirror 21 at different focus

At the best focus (Figure 55) and for all PSFs, 80% of the energy is encircled in a diameter between 25 and 40 μm . It is compliant with the specification (80 % encircled energy in a maximum diameter of 46 μm). The Figure 54 presents a comparison between the theoretic and measured PSF. The theoretical coma and astigmatism predicted by Zemax optical model for the measured PSF are represented on the Figure 55.

3.5. Size and shape of the exit pupil

The last test in warm conditions consists in the determination of the size and shape of the exit pupils. The illumination module is the same as the PSF measurement but the calibration grid is exchanged by a hole of 500 μm diameter. The low spectral filter at 600 nm is used. For the detection module, an objective focused at infinity is installed on the rail. The detector is located at its focal plane. The individual exit pupils are measured because the slices are lighted one by one for three points along each slice (Figure 56).

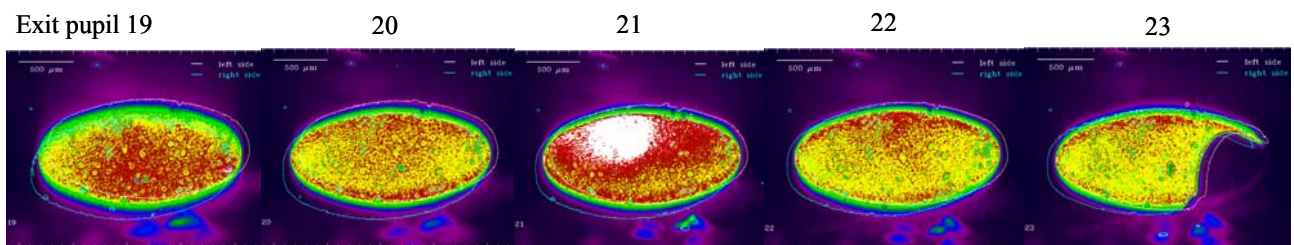


Figure 56 : The five exit pupils

Theoretically, the maximum diameter predicted by Zemax along x axis is 10.5 mm and 5.9 mm along y axis. For each measured exit pupil, the diameters are smaller than Zemax data. For the exit, the data are compliant with their specifications.

In conclusion, the warm tests have allowed to verify the system-level requirements in various planes. Only minor non-compliances have been found and these room-temperature tests have been judged succesfull, allowing to proceed for the cold tests.

4. VISIBLE TEST AT OPERATING TEMPERATURE ⁷

The cold tests have been performed at the University of Durham during three weeks just after the warm tests. The goal of these tests was to validate the mechanical structure and the optical design during the cooling down to 30K.

4.1. General view and set up

The goal is to compare the results of the warm tests with those of the cold tests. Two optical tests are performed: the measure of the absolute location of each slit with the determination of its width and the measure of PSFs. In a first time, the optical bench is set up and adjusted at ambient temperature. After that, measurements are made at ambient temperature. Once vacuum is done, new measurements are proceeded at ambient temperature with vacuum. The prototype is cooled and after the alignment is readjusted and measurements are made at cold temperature. The prototype is warmed and the measurements are checked at ambient temperature. Because of the travel, the optical components are readjusted thanks to fast optical test in the pupil mirror plane (Figure 46) and in the slit mirror plane (Figure 51).

As for the warm tests, the test bench is composed of three main modules: the prototype modules setup in the vacuum chamber, the illumination module (the same as the warm tests) screwed on the entrance window, the detection module composed of two doublets associated with the CCD camera put on the optical bench and two lasers (one entrance and one for the exit) for the alignment (Figure 57).

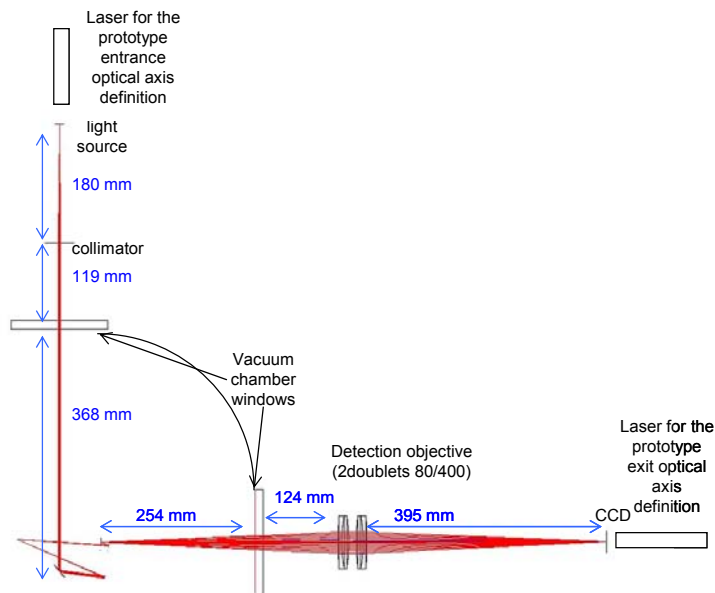


Figure 57 : Cold tests setup

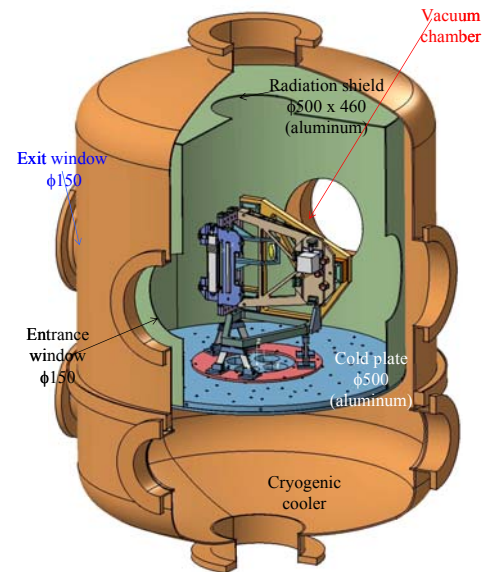


Figure 58 : Prototype in the vacuum chamber

The prototype is placed at the centre of the cold plate (Figure 58). The entrance and exit optical axes are perpendicular to the vacuum chamber windows. Floppy interfaces in G10 ensure the isolation between the prototype and the cold plate. The most important is the repeatability of the illumination and detection module adjustments. The alignments of the internal modules, the calibration and the global setup are the same for the warm tests.

4.2. Cooling set up

The goal is to cool down the entire prototype down to 30K. The thermal contact between the prototype and the cold head is driven by the thermal straps. These ends are bolted on the prototype mechanical structure near to the optical components. For controlling the temperature, five thermometers are put on the structure (Figure 59).

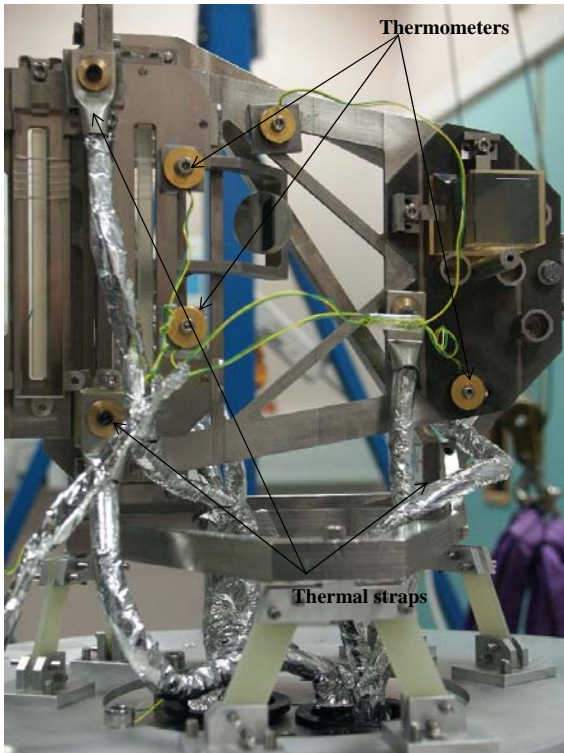


Figure 59 : Thermal straps and thermometers



Figure 60 : Prototype below the radiation shield

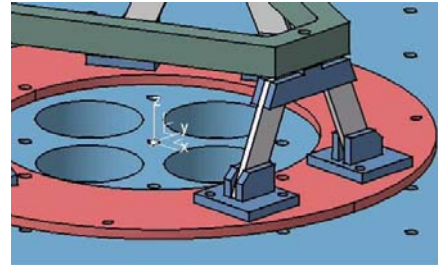


Figure 61 : Thermal isolation

For efficient cooling, the radiation shield was fixed on the external diameter of the cold plate which isolated the prototype from the vacuum chamber and some MLI are put around (Figure 60). Due to the poor thermal conductivity of Invar, we had thermal gradients within the prototype. Once the temperature stabilized, the slicer stack sensor reached 28.3 K and the pupil and slit mirrors went to 49.6 K (Figure 62). The thermal sensor on the slit mirrors was glued on the structure. Because of the thermal isolation of the glue, the actual temperature is 2-3 K higher than indicated by the sensors.

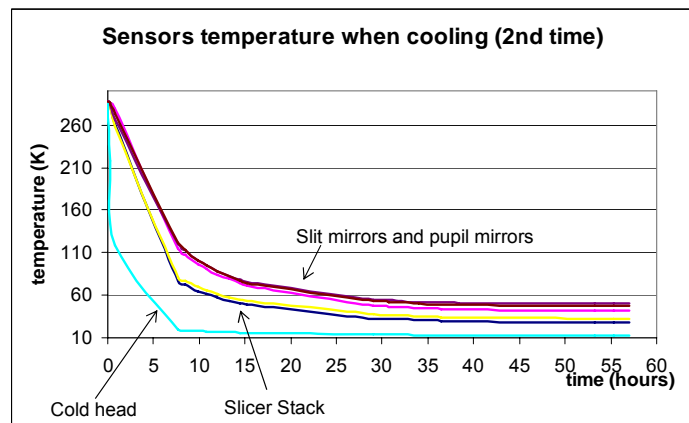


Figure 62 : Curve of cooling

4.3. Location, size and shape of mini-slits

Due to vignetting problems in the cold-test optical setup, we were not able to measure the length of the mini-slits. The main goal was to measure the changes of the prototype characteristics between ambient and cryogenic environment. For evaluating the prototype internal movements, we measured at cold temperature the pseudo slit location along y axis with regard to the location at ambient temperature. The reference is the edge of the slit mirror.

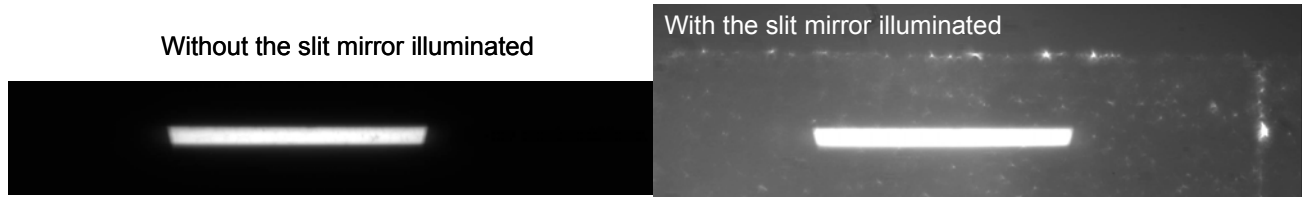


Figure 63 : Pseudo slit n°21

The measurement accuracy was $\pm 4 \mu\text{m}$ along y axis and $\pm 20 \mu\text{m}$ along x axis between room and cryogenic temperatures. The width before and after the cooling was not changed that is to say $75 \mu\text{m}$.

4.4. PSF measurement

For this test, the detection module with a magnification of a factor 5 and the band-pass spectral filter centred at 577 nm are used. The goal is to measure the characteristics of a grid of PSFs centred on the slit mirrors. The grid of holes with a diameter of $10 \mu\text{m}$ is installed in the focal plane of the collimator in the illumination module. This grid is firstly imaged on the slices and then on the slit mirror after the pupil mirrors. There are two main goals for this measure. In a first step, with a high alignment and a correct repeatability of the illumination module, the image location variations is measured along x and y axis with a good accuracy ($\pm 20 \mu\text{m}$). Mirror edges make a suitable reference for this measure. In a second step, the goal is to see the effect of cooling on the PSFs. On the Figure 64, we see the grid image which allows to calculate the PSFs.

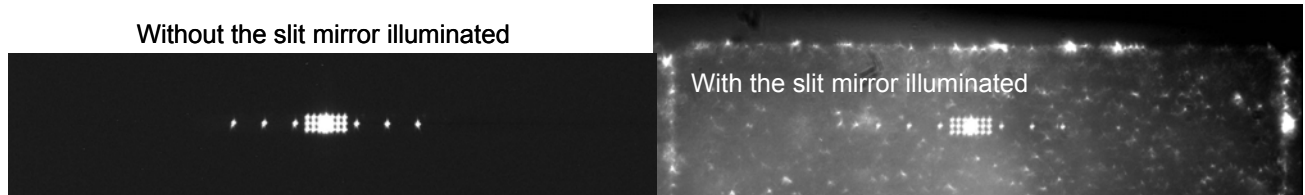


Figure 64 : PSFs grid on the slit mirror 21

The measurement of the displacement of the grid before and after establishing the vacuum is $3.8 \mu\text{m}$ along x axis and $5.7 \mu\text{m}$ along y axis. This error is certainly a measurement error.

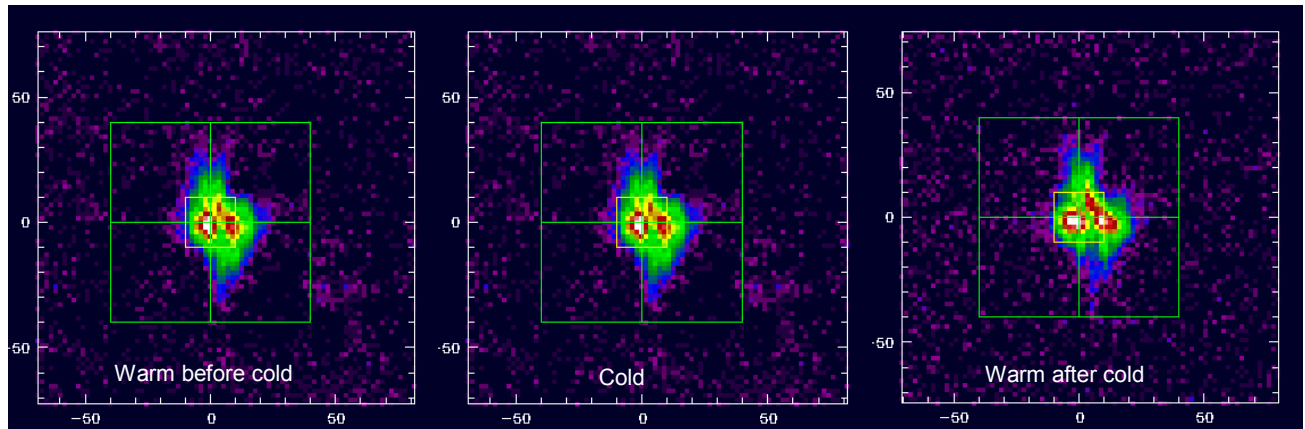


Figure 65 : PSF shape on the slit mirror 21 during 3 steps

Thanks to the Figure 65, the variation due to the cooling of the PSFs line on the slit mirrors is of $\pm 20 \mu\text{m}$ along x axis and $\pm 5 \mu\text{m}$ along y axis. 80% of the encircled energy is contained in a circle with a radius of $25 \mu\text{m}$. The cold tests have allowed to validate the mechanical structure and the optical components at the cryogenic environment.

5. CONCLUSION

The design, manufacturing and testing of an image slicer prototype for the future James Webb Space Telescope have been presented. An all-reflective optical design have been used with individual optical elements in ZERODUR assembled using the optical-bonding technique. The mechanical structure was in Invar. The manufacturing, assembly and integration processes have been validated. System-level, room-temperature optical tests have shown that optical and alignment requirements were met. This study has demonstrated the feasibility of a complete image slicer unit for space-based, cryogenic (30 K) applications. The various tests performed both at room and operating temperatures have allowed to check that the system will survive the cool-down. Furthermore, vibration tests will be conducted in July 2004 and together with the tests described in this paper, should bring this technique to ESA technical readiness level TRL6. Although the IFMOS instrument will probably never exist (it was only a backup concept for NIRSpec), a high-spatial and spectral resolution integral field unit based on the advanced image slicer technique is now available as an option in the NIRSpec spectrograph. This technique is also spreading quickly in ground-based astronomy and image slicers are foreseen to equip most if not all future spectrographs of telescopes like the European Very Large Telescope.

REFERENCES

1. Lefèvre et al., "IFMOS: Integral Field Multi Object Spectrograph for the NGST", 2000, in "Imaging the Universe in Three Dimensions", Eds. W. van Breugel & J. Bland-Hawthorn, ASP conference, vol. 195, p431
2. Content et al., "ESA NGST integral field and multiobject spectrograph slicer system", SPIE vol. 4013, p. 851, 2000
3. E. Prieto and al., "Great opportunity for the NGST-NIRSpec: a high-resolution integral field unit", SPIE Proc., 4850, p.486, 2002
4. C. Bonneville and al., "Design, prototypes and performances of an image slicer system for integral field spectroscopy", SPIE Proc., 4842, p. 162, 2002
5. C. Macaire, "Image Slicer Prototype Design Document", LAM internal report n° LAM/OPT/SLI/TRE/0046
6. C. Bonneville and al., "Image slicer manufacturing: from space application to mass production", SPIE Proc., 5494, 2004
7. C. Macaire, "Tests Report", LAM internal report n° LAM.OPT.SLI.RAP.040116_01
8. C. Macaire and F. Laurent, "Image Slicer Prototype Test Plan", LAM internal report n° LAM/OPT/SLI/RPT/0038
9. F. Laurent, C. Macaire and P. Ferruit, "Report on the preliminary results of the tests of the ESA image-slicer prototype", MUSE report n° MUSE-MEM-TEC-061
10. F. Laurent and al., "Optical Design, Fabrication and Testing a prototype of the NIRSpec IFU", SPIE Proc., 5252, p. 443, 2003

Optical design, manufacturing and tests of the MUSE Image Slicer

Florence Laurent ^{a, b}, Edgard Renault ^a, Roland Bacon ^a,
Jean-Pierre Dubois ^a, François Hénault ^a, Daniel Robert ^a

^a CRAL - Observatoire de Lyon, 9, Avenue Charles André, 69230 Saint-Genis-Laval, France

^b CYBERNETIX SA, 306 rue Albert Einstein BP 94, 13382 Marseille, France

ABSTRACT

MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer) is a second generation integral field spectrograph proposed to the European Southern Observatory (ESO) for the VLT. MUSE combines a $1' \times 1'$ Field of View (FoV) with a spectral resolution going to 3000 and a spatial resolution of $0.2''$ provided by the GALACSI adaptive optics system. MUSE is operating in the visible and near IR wavelength range ($0.465\text{-}0.93\ \mu\text{m}$). It is composed of 24 identical integral field units; each one incorporates an advanced image slicer made of a combination of mirrors and mini-lenses arrays. During the feasibility study, a slicer prototype has been designed, manufactured and tested. This paper firstly describes an original approach for the slicer optical design and manufacturing. Then, we will focus on the optical tests of the prototype. These tests included the control of the angular tilts and assembling method of the slicer, the measurements of the position, size and shape of the pseudo-slits, the measurements of the Point Spread Function (PSF) for the slice-slit imagery on the whole FoV and an estimation of the size of the global exit pupil. We finally conclude on the feasibility of MUSE image slicer and its possible improvement for the next design phase.

Keywords: Integral Field Unit, Integral Field Spectroscopy, Advanced Image Slicer, MUSE instrument, VLT instrumentation.

1. INTRODUCTION

Integral Field Spectroscopy (IFS) allows the simultaneous observation on the same detector array of two-dimensional sky maps and a spectral decomposition of light reducing the observation times. IFS rearranges the data cube represented by two spatial dimensions defining the field and the spectral distribution (x, y, λ) in the detector plane. In the frame of the European Southern Observatory (ESO) development plan, MUSE (Multi Unit Spectrograph Explorer) is currently entering in its Preliminary Design Phase following a positive recommendation by ESO Scientific Technical Committee after completion of a successful study phase ¹. The MUSE Consortium consists of groups at:

- Centre de Recherche Astronomique de Lyon –management, system engineering, optical architecture and Assembly - Integration and Test (AIT)
- University of Goettingen – mechanical structure and fore-optics
- AIP Postdam – calibration unit and software
- Sterrewatch Leiden – adaptive optics
- ETH Zürich – spectrograph
- ESO – detectors.

MUSE ⁰ is an innovative integral field spectrograph which will be installed on the VLT Nasmyth platform. It has a Field of View (FoV) of $1 \times 1\ \text{arcmin}^2$, sampled at $0.2''$ in Wide Field Mode (WFM) and $7.5 \times 7.5\ \text{arcsec}^2$ sampled at $0.025''$ in Narrow Field Mode (NFM), both assisted by a ground layer adaptive optics system named GALACSI. MUSE operates in a large visible and near IR spectral range ($0.465 - 0.93\ \mu\text{m}$) with an average spectral resolution of 3000. It will be especially optimized for the study of the progenitors of normal nearby galaxies out to high redshift and as a spectrophotometric sounder that will cut the Universe into thin and deep slices. The MUSE instrument is equipped with a fore-optics including an optical derotator, a calibration unit, an atmospheric dispersion compensator (in NFM) and splitting and relay optics which feed 24 identical modules. Each one is composed of an original advanced image slicer with a combination of mirrors and mini-lenses arrays, a high-throughput spectrograph with a Volume Phase Holographic Grating and a $4k \times 4k$ CCD. This paper describes the original design of MUSE image slicer (§ 2), shows the manufacturing and assembling of a slicer prototype (§ 3) and presents the optical tests performed on this breadboard complying with top-level requirements (§ 4).

2. MUSE SLICER OPTICAL DESIGN

2.1. Description of optical design

During the feasibility study, the image slicer was deemed as the most critical among all MUSE optical subsystems. This section describes its optical design with their requirements. The two main optical functions of the MUSE image slicer are:

- To transform a rectangular FoV in a series of mini-slits at the spectrograph entrance plane.
- To reimaging the telescope pupil at infinite distance.

The Table 3 presents the technical performances of the MUSE image slicer derived from top-level requirements of the instrument ³. The most important of them were tested on an optical bench as described in section 4.

| REQUIREMENTS | VALUES |
|--|--|
| Spectral range | From 0.465 to 0.93 μm |
| Slice number | 38 |
| Slice length | 81 ± 0.5 mm |
| Slice height | 1.59 mm (average value) |
| Magnification ratio | 0.043 ± 10^{-3} |
| Pseudo-slit curvature | Between -2 and $+2$ m^{-1} |
| Mini-slit arrangement and positioning accuracy | Mini-slits arranged in alternate rows, within a 34.5 μm accuracy along x-axis and 100 μm accuracy along y-axis |
| Input F/D # | 103.8 along x-axis, 207.6 along y-axis |
| Input pupil position | Nominal value: -575 mm |
| Output F/D # | Nominal value = 4.5 Minimal value ≥ 4.05 (corresponding to a 10% margin) |
| Output pupil location | Between +1 m and infinite distance |
| Image quality | ≥ 85 % of Enclosed-in-a-rectangle Energy in 35x70 μm , at Pseudo-slit plane |
| Lateral chromatism | ≤ 34.5 μm |
| Micro-roughness of optical surfaces | ≤ 2 nm Root Mean Square (RMS) |
| Optical transmission | ≥ 96 % |

Table 3 : General performance requirements

The principle of the image slicer is based on the concept proposed by R. Content in 1997 ⁴. It is composed of three reflective elements (a slicer stack, pupil and slit mirrors), each made of different mirrors having different geometrical characteristics (mirror tilts and curvature radius). In the case of MUSE (38 different components per reflective element), this concept is not well adapted because of:

- A large FoV which increases the incident rays on the slicer, giving pupil aberrations.
- A small slicer magnification ratio which is critical for the image quality.
- A number of different optical elements (114) which leads to manufacturing and assembling risks and an high cost.

Most of the previous problems can be overcome by replacing the pupil and slit mirrors with identical dioptric elements (mini-lenses) and adding two lenses.

The MUSE image slicer is composed of the following elements (Figure 66):

- A telescope pupil.

A spherical mirror images the FoV on the slicer and is placed at the telescope pupil location. As a consequence, the angle of incidence on the slicer is small (1°) and the optical path is nearly the same for the top and bottom slices, hence reducing aberrations and optimizing the optical quality. The telescope pupil is materialized by an elliptic mask (5.77 mm along x-axis and 2.54 mm along y-axis) and is located at 575 mm in front of the slicer.

- A slice stack.

The telescope FoV is focused on the slicer stack, which forms different images of the telescope pupil located just after the input lens (see below). These discontinuous mirrors cut the field and each mini-slit is arranged in two staggered rows thanks to the orientations (tilts) of the slices. All slices have different tilts i.e. their curvature centres are decentred along x- and y-axes. The tolerances on these tilts are tight: the sphere centre location must be better than 50 μm along x-axis and 100 μm along y-axis. Moreover, they have the same curvature radius ($604.63 \pm 0.75 \text{ mm}$). In consequence, the slices are shifted along z-axis and the optical path remains the same for all the mini-slits. The slicer stack is composed of 38 slices. Each slice is 81 mm long and 1.59 mm thick and is made of zerodur. An average distance of 600 mm separates the slicer from the input lens.

- An input lens noted L1.

The L1 focus coincides with the slicer so that the field is at infinity for the Pupil Lens Row (PLR) and the beams are perpendicular to the row. Only the central part of this lens is useful (a rectangular aperture with a 15 mm width and a 150 mm length), the two unnecessary areas lens can be truncated if it is helpful. A free space of 14.7 mm is available between L1 and PLR.

- The Pupil Lens Row (PLR).

For each slice, the pupil is focused 750 μm before the PLR; a pupil stop is put there. The field, which is at infinity before the pupil lenses, is imaged at the focal plane of the PLR that corresponds to the Field Lens Row (FLR). In order to avoid any vignetting in the mini-lenses, they are arranged in two shifted and staggered rows. All pupil lenses are identical. The size of each plano-convex lens is 7.326 x 7.326 mm and its thickness is 5.6 mm. The distance between PLR and FLR is 34.2 mm. The dimension of the clear aperture of each PLR in both x-y directions is 6 mm x 3 mm.

- The Field Lens Row (FLR).

For each slice, the mini-slit is focused 750 μm before the FLR, where a field stop is put. The telescope pupils located at the pupil lenses are imaged at infinity through the FLR which is quite similar in design to the PLR. However, they differ from the optical shape (meniscus lens) and thickness (17.9 mm). On the FLR, a slice image is 3.49 mm x 0.07 mm and the gap between two slits is about 174 μm . The FLR and L2 are a 20 mm apart.

The PLR and FLR are tilted around z-axis with an angle of 1.07° . Moreover, the top and bottom rows are shifted of a quantity 67 μm and -67 μm respectively in order to optimize the pseudo-slit arrangement.

- The exit lens denoted L2.

In the same way as the PLR, we associated an “exit lens” L2 to the FLR, so that all the images of the telescope pupils will be located in one single given location, that is the spectrograph entrance pupil. The doublet is useful to improve the axial chromatism of the system and produces a virtual image of the slit located between the FLR and L2. Like the input lens, this doublet can be truncated if necessary.

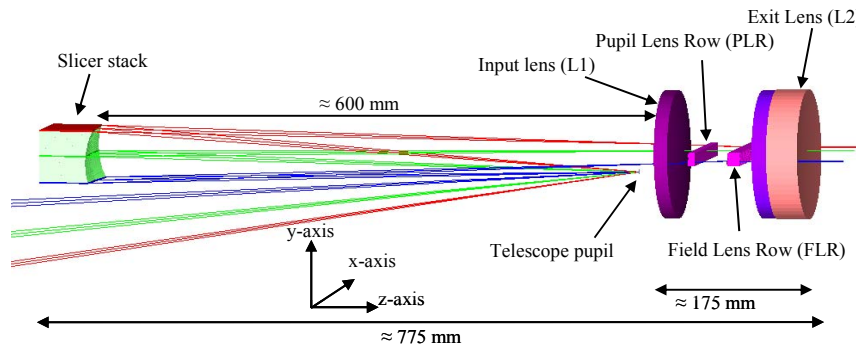


Figure 66 : 3D representation of MUSE image slicer

2.2. Description of the prototype

During the feasibility study, an image slicer prototype has been manufactured based on the previous design. This MUSE prototype is composed of a slicer stack with 12 active slices (four at the bottom of the stack – number 1, 2, 3, 4 –, four at the centre – n°19, 20, 21, 22 – and four at the top – n°35, 36, 37, 38) being separated by dummy slices which have a planar active surface. Moreover, this prototype is also constituted of an input lens L1, an exit lens L2, four pupil and field lenses which are shifted along the cross-dispersion direction in order to coincide with the groups of four active slices.

3. OPTICAL FABRICATION OF THE MUSE PROTOTYPE

3.1. The slicer stack

3.1.1. Manufacturing process

The manufacturing, assembling and testing of a slicer stack is a Research and Development activity conducted in cooperation between the Cybernetix company (Marseille, France) and our laboratory for 3 years^{0,0}. The slicer stack of the MUSE prototype was manufactured by Cybernetix using classical polishing tools¹⁸. Each slice has a different spatial and spectral offset in order to direct each reflected beam towards its corresponding pupil lens. Each slice is extracted from one block of zerodur. This material presents a low thermal expansion and allows easy molecular adhesion between each slice. To achieve the correct dimensions of the slice, the plane surfaces of the zerodur block are polished respecting parallelism and perpendicularity of all surfaces and the last are controlled at the interferometer. The back and lateral side of the slice are also polished with a perpendicularity requirement inferior to 15 arcsec. These two surfaces are reference planes during the assembling (Figure 67). For cost and manufacturing reasons, the tilts of the slices are antisymmetric and can be polished in pairs. To respect tilt requirements, the positioning of slices on the polishing sphere is crucial. Accurate wedges are inserted between slices by molecular adhesion (Figure 68). Once the active surfaces of the slices

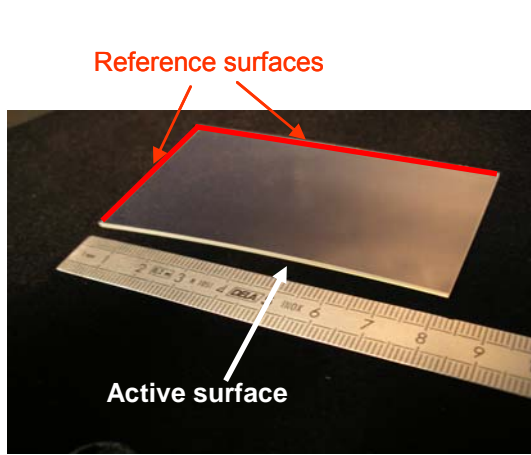


Figure 67 : Slices reference surfaces

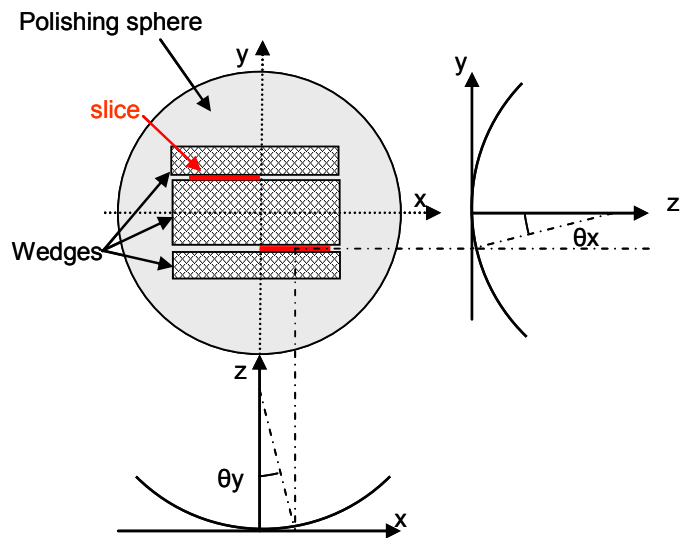


Figure 68 : Slices positioning on the polishing sphere

3.1.2. Assembling process

All slices are assembled by molecular adhesion, also named “optical contact” or “glass to glass bonding” allowing to bond two extremely flat ($\lambda/10$) and smooth surfaces at room temperature without cement¹⁸. This technique is usually practised in optical workshops to assemble glass blocks during polishing (Figure 68) and is also used for special assembly requiring high precision positioning, thermal stability or cryogenic environment withstanding. Critical parameters influencing molecular adhesion typically are:

- Roughness
- Flatness – Parallelism
- Cleanliness
- Material
- Internal stress due to assembly
- Stress due to mounting
- Pre and post-adhesion process

The molecular adhesion on the slicer allows to achieve high quality (uniformity, correct positioning, mechanical characteristics), easiness of operation, reproduction and reliability of the final control. The design must take into account the interface between “support” parts (a heel holding the stack of slices) and sub-elements to be adhered, mechanical stress into the material close to the surfaces of adhesion. The control of the adhered surfaces (flatness, roughness, scratch and digs) and accurate cleanliness procedures are the key points to ensure the efficiency and repeatability of the assembling process. The advantages of this process are that the quality of the adhesion and correct positioning can be verified visually just after the optical contact. Since, the slicer stack is located on a special support with three pins constituting a trihedral: two are located on the back surface and one on the lateral one (Figure 69). After each molecular adhesion, the back and lateral surfaces are controlled at the interferometer. The Figure 70 presents the MUSE slicer stack with 12 active and 26 dummy slices.

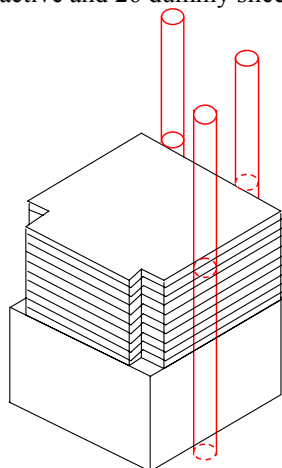


Figure 69 : Assembling process

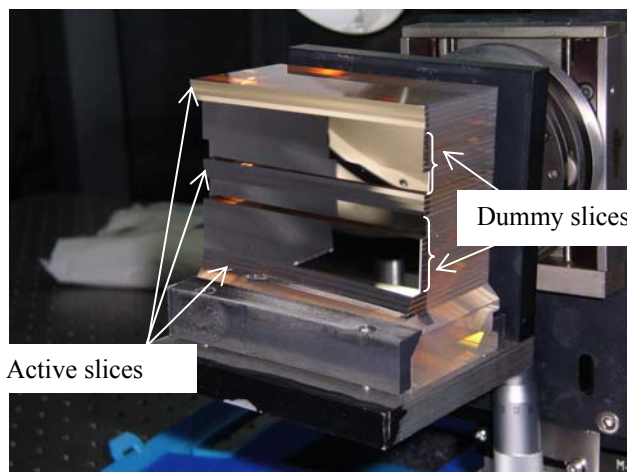


Figure 70 : The MUSE slicer stack with 12 active and 26 dummy slices

3.2. Other components of the image slicer

The other optical elements of the MUSE prototype (L1, PLR, FLR and L2) were manufactured by the SESO company (Aix-en-Provence, France). The assemblies of PLR and FLR and the mechanical structures holding the components have been carried out in the CRAL workshop (Figure 71 and Figure 72).

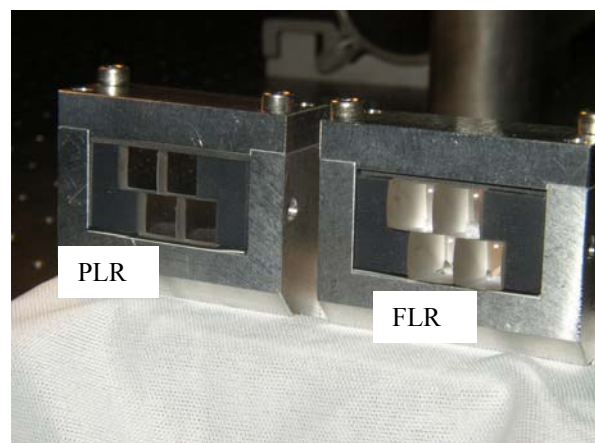


Figure 71 : PLR and FLR constituted of 4 mini-lenses



Figure 72 : L1 and L2

After a visual inspection of all components, tests of this image slicer on an optical bench could be started at CRAL.

4. TESTS ON OPTICAL BENCH

The tests of the MUSE prototype were carried out in the optical laboratory at CRAL following the image slicer test plan⁸.

4.1. General view - Optical bench composition

4.1.1. Overview of test set-up

The test bench is composed of three main modules (Figure 73):

- The slicer prototype module
- The illumination module
- The detection module

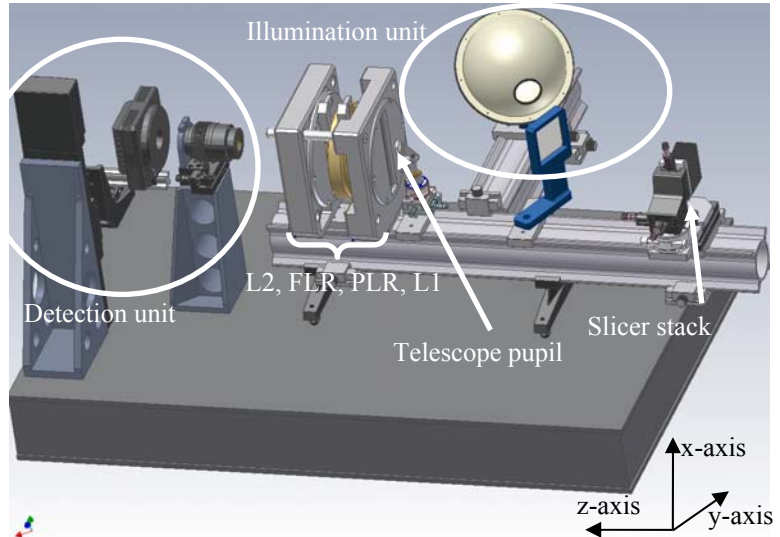


Figure 73 : General view of the optical bench

The slicer prototype module is integrated following two different arrangements. Each one is set up in function of the test to be realized. In the arrangement n°1, only the telescope pupil, the stack of slices and L1 are mounted on the prototype (see section 4.2.1). For the arrangement n°2 (see sections 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 and 4.2.6), all the optical elements of the prototype (the telescope pupil, slicer stack, L1, PLRs, FLRs and L2) are used.

The slicer prototype module is mounted on the same rail and is composed of (Figure 73):

- The telescope pupil juxtaposed on a spherical mirror ($R=400\text{mm}$), mounted on 2 rotation stages around x and y-axes and fixed on the frame of L1.
- The stack of slices mounted on 2 rotation stages around x and y-axes and 3 translation axes along x, y and z-axes.
- L1 mounted in a specific barrel constituting the mechanical reference without adjustment stages.
- PLR and FLR mounted together on one rotation stage around z-axis and one translation stage along z-axis. PLR and FLR are fixed on the frame of L1 and are implemented in a mechanical structure with a translation stage along x-axis.
- L2 mounted in a specific barrel fixed on the L1 one.

Figure 74 shows the mechanical structure of L1, PLRs, FLRs and L2.

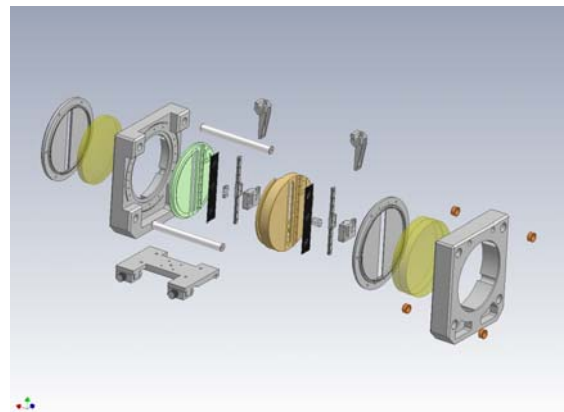


Figure 74 : Mechanical layout of L1, PLRs, FLRs and L2

The illumination module is composed of (Figure 75):

- Two interchangeable sources (a Xenon and Mercury lamp).
- A filter wheel with three narrow band pass filters (436, 577 and 823 nm) corresponding to MUSE spectral domain.
- An integrating sphere.
- A folding square mirror for compactness purpose.
- Two interchangeable diaphragms
 - A rectangular aperture which covers the slicer with nearly uniform illumination.
 - A grid of 10 μm pinholes aperture which simulates diffraction limited point sources.

All these elements are placed on the optical bench as shown on the Figure 75 and aligned with the prototype slicer module thanks to a combination of three lasers (see section 4.1.2).

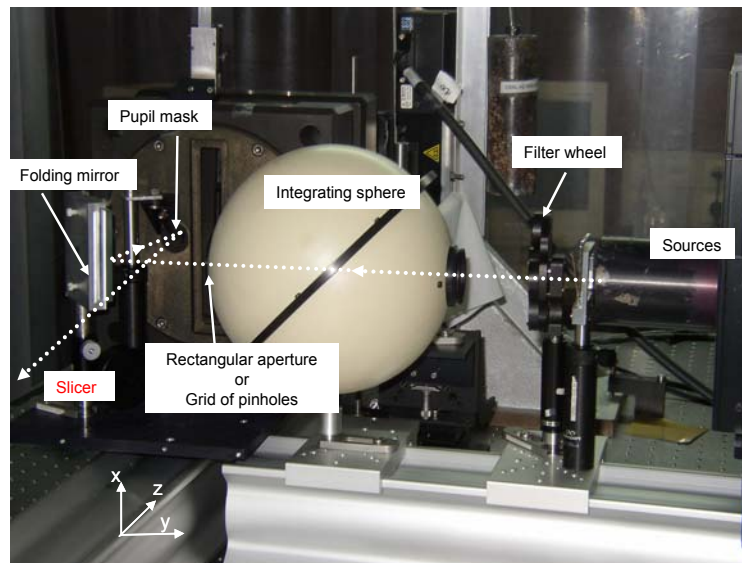


Figure 75 : Illumination module

The detection module works following four configurations that are selected in function of the tests to be realized. The main differences between the configurations are the optical conjugation and magnification on the CCD camera. Mainly, the detection module is composed of:

- A CCD camera (Apogee AP2Ep Grade 3) located in the focal plane of collimator lenses or microscope objectives.
- A collimator lenses (one working with magnification $\times 1$ mounted on CCD camera (Figure 76) and another working at infinity mounted on its own support).
- Two microscope objectives (magnifications $\times 4$ and $\times 5$) mounted on the detector with a specific support and located between the collimator lens and the CCD detector (Figure 77).

All the elements constituting the detection unit are placed on 3 motorized translation stages shown on the Figure 76 and Figure 77 and are aligned together following the procedure described in section 4.1.2.

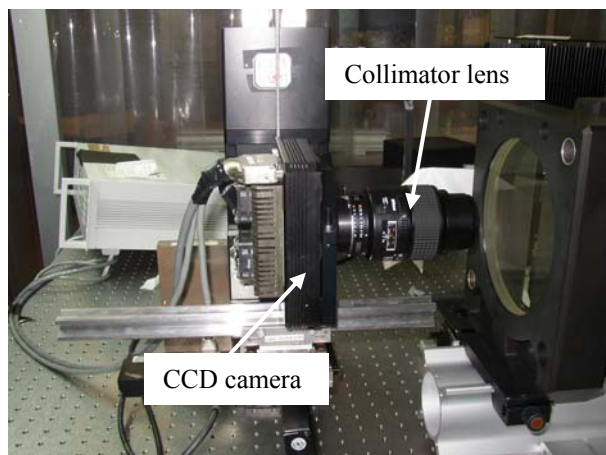


Figure 76 : The detection module with collimator lens

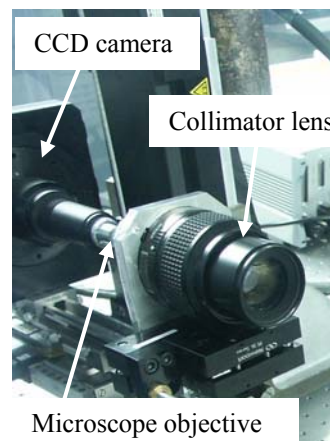


Figure 77 : The detection module with collimator lens and microscope objective

4.1.2. Alignment procedure

L1 and its mechanical structure is the opto-mechanical reference for the prototype slicer module. The laser 1 and 3 visualize the optical axis through the image slicer system thanks to the autocollimation on L1. The perpendicularity of 90° between the laser 1 and 2 is achieved with a cube beamsplitter located at the slicer plane. Thanks to the theodolite, the global slicer tilt (1° around x-axis) is applied. With these two virtual axes, each element is put one after other at the correct location thanks to their stages having different degrees of freedom (Figure 78). The slicer prototype module is integrated step by step following the tests sequence described in section 4.2.

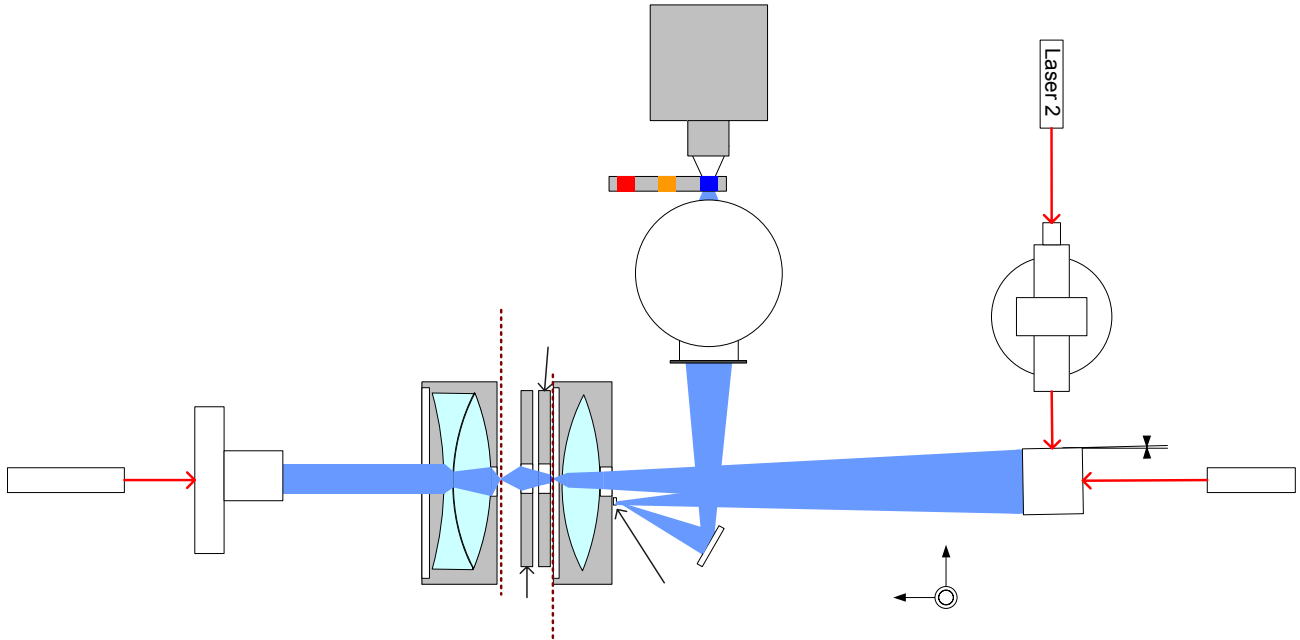


Figure 78: Schematic diagram of the test bench

4.1.3. Calibration

For each test, the detection module is calibrated in axial and lateral chromatism. A grid of pinholes is used for that purpose. The z-axis is scanned by steps of $25 \mu\text{m}$. For each focus and all pinholes, the mean illumination is computed. The best focus corresponds to the maximum of the fitted curves (Figure 79). Knowing the theoretical distance between the pinholes on the grid, the magnification can be deduced and the location of the focal plane along z-axis for each wavelength is given by the encoders of the motorized stages.

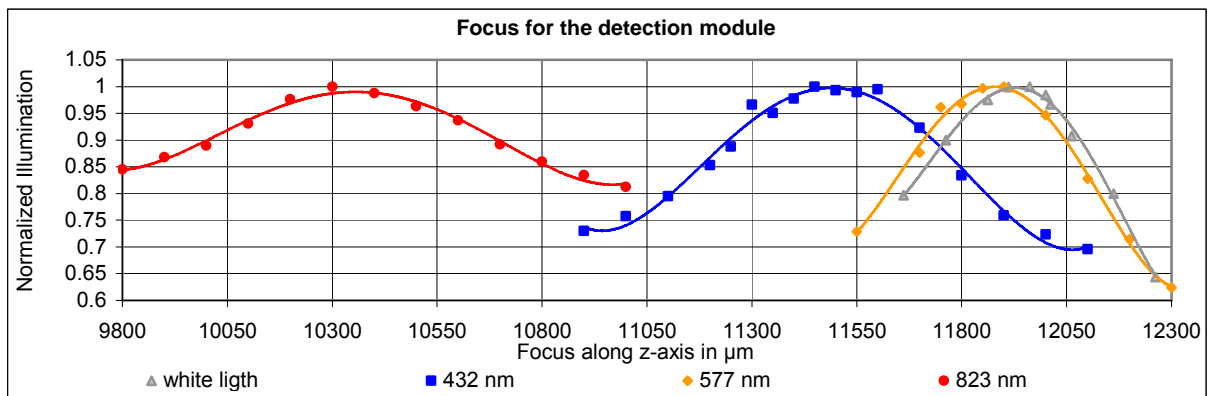


Figure 79 : Focus curves at different wavelengths for the detection unit

4.2. Optical tests

The optical tests have been performed at the CRAL laboratory during three months. The goal of these tests was to validate the top-level requirements summarized in Table 3.

4.2.1. Measurement absolute locations of telescope pupil images

The goal of this measure is to check the angular tilts of the slicer at 436, 577 and 823 nm. A rectangular aperture simulates the telescope focal plane and the detection unit is used with a magnification $\times 0.7$. Four images of the telescope pupil are simultaneously recorded on the detector. Only the slicer stack and the input lens L1 are integrated to the prototype and we placed the detection module just behind L1. Knowing the correct positioning of the motorized translation stages, twelve images of the telescope pupil are reconstructed (Figure 80). A dedicated software gives the diameters, the absolute and the relative locations of the centroid of each pupil.

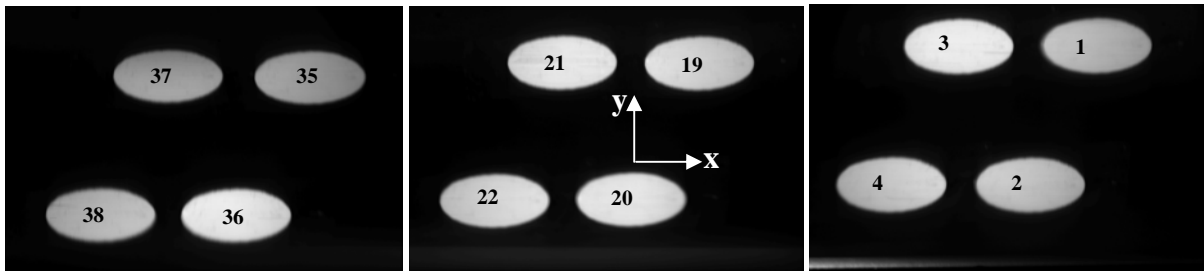


Figure 80: Raw images of the telescope pupils at 577 nm

The Figure 81 shows the absolute positioning along x-axis of the pupil images. It can be seen that:

- It is compliant with the requirement ($\pm 50\mu\text{m}$) for 9 slices (n°1, 2, 3, 19, 20, 21, 22, 37 and 38)
- It slightly exceeds the requirement for the slice n°4 with a shift going to $60\mu\text{m}$. But this error was found to be acceptable for both prototype and instrument.
- It is four times higher than the requirement for the slices n°35 ($-200\mu\text{m}$) and n°36 ($+170\mu\text{m}$).

Additional investigation was conducted about this non-conformity (see section 4.2.2)

Figure 82 shows that the absolute positioning is compliant with the requirements ($\pm 100\mu\text{m}$) along the spectral direction (y-axis).

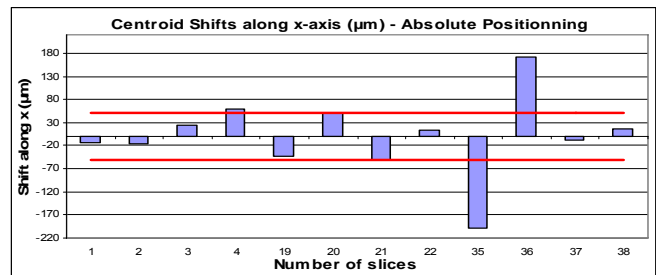


Figure 81: Absolute positioning along x-axis

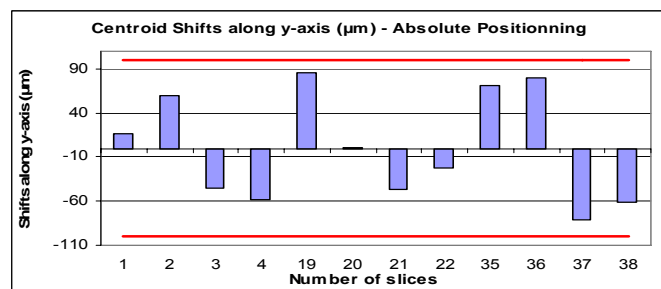


Figure 82: Absolute positioning along y-axis

4.2.2. Measurement of back and lateral surfaces on the slicer

The back and lateral surfaces of this slicer have been controlled with an interferometer at Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM). On the Figure 83, the slice n°36 clearly looks tilted on both sides. For this interferogram, the optical reference is the slice n°21. Counting the fringes and using a basic formula, the tilt errors of slice n°36 were estimated to $160\text{ }\mu\text{m}$ and $200\text{ }\mu\text{m}$ on the back and lateral surfaces respectively. This is coherent with the results achieved in section 4.2.1. In conclusion, slice 36 is misassembled but this error could have been eliminated with a greater attention from the supplier during assembling and slice 35 presents a manufacturing defect.

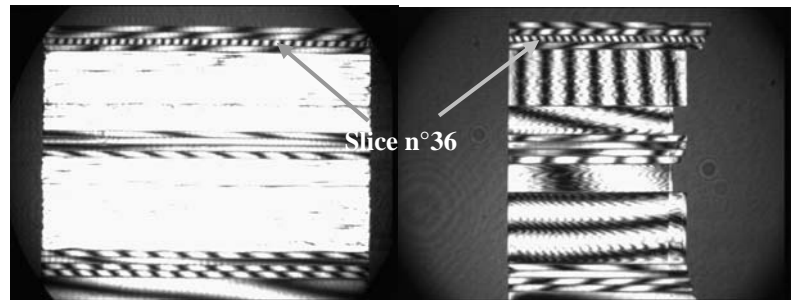


Figure 83: Back surface of the slicer (left) – Lateral surface (right)

4.2.3. Measurement of the gap between each mini-slit

The goal of this measure is to check the relative location of the images of each slice at 436, 577 and 823 nm. The detection unit is used with a magnification $\times 0.7$. Four images of the mini-slits are simultaneously recorded on the detector. A rectangular aperture simulates the telescope focal plane in the illumination module. On the pseudo slit plane (located between FLR and L2), two consecutive slits are separated by $174.5 \pm 69\text{ }\mu\text{m}$. A dedicated software computes the relative location of each slit along both axes, the gap between mini-slits and the mini-slit length. Raw results are presented on the Figure 84.

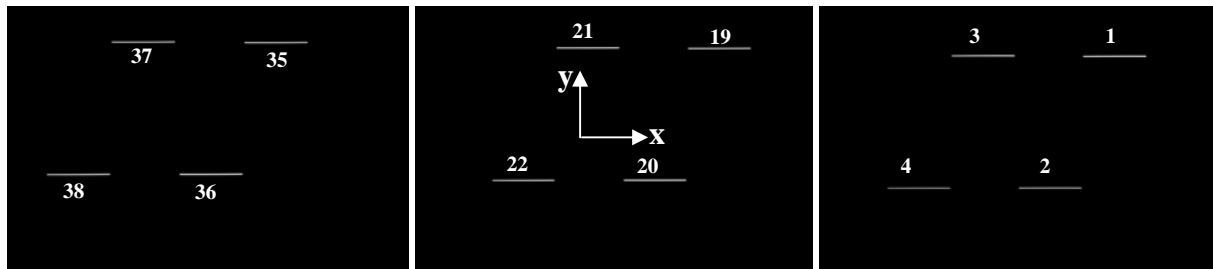


Figure 84: Pseudo-slit at 577 nm

On the Figure 85, the gaps between two mini-slits are compliant with the requirement ($174.5 \pm 69\text{ }\mu\text{m}$) for the three wavelengths.

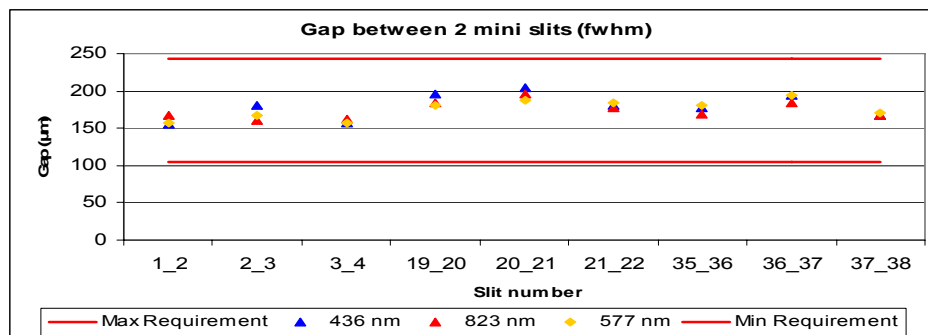


Figure 85: Gaps between the mini slits at 3 wavelengths with a detecting threshold at FWHM

4.2.4. Measurement of the size and shape of the individual mini-slit

This test consists in observing each slit individually in order to evaluate its size and shape. The detection module is used with a magnification $\times 4$ (a collimator lens with a magnification $\times 1$ associated with a microscope objective $\times 4$). A rectangular aperture simulates the telescope focal plane in the illumination module. The acquisitions are made at 577 nm because we do not expect a significant chromatism aberration here.

On the Figure 86, only one slit is imaged on the detector where there is a slight vignetting caused by the detection module. The length of each mini-slit is estimated from a Full Width at Half Maximum (FWHM) criterion and coincides with the requirement (3.49 ± 0.081 mm). The mean slit width is 65 ± 5 μm which doesn't fit with the requirement of 69 ± 1.6 μm . The detection module is not adapted to the width measurement and the measured uncertainty is large (± 5 μm) because of a high sensitivity of the threshold definition for the FWHM. The geometrical width is the convolution integral between the PSF of the system and a rectangular function representing the slice. The convolution integral along y-axis gives a less accurate result than along x-axis. This measurement uncertainty could be decreased using higher magnification optics in the detection module.

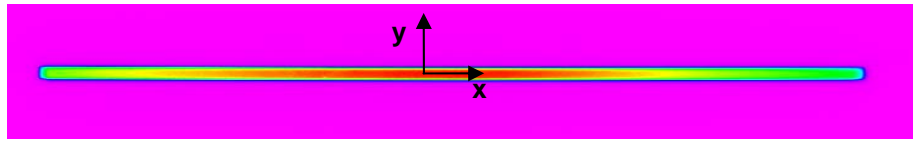


Figure 86: Slit n°22 at 577 nm

4.2.5. Point Spread Function (PSF) measurements

In order to evaluate the image quality of the prototype, PSF measurement are performed in the pseudo-slit plane. The detection unit is used with a magnification $\times 5$ (a collimator lens with a magnification $\times 1$ associated with a microscope objective $\times 5$). Seven PSFs of the slice-slit imagery are simultaneously captured on the detector. The full slit length is covered by fourteen PFSs. A grid of pinholes is located on the telescope focal plane within the illumination module. The acquisitions are made at 436, 577 and 823 nm. In the pseudo-slit plane, we must have 85 % of enclosed energy in a square of 34.5 μm side represented on the Figure 87.

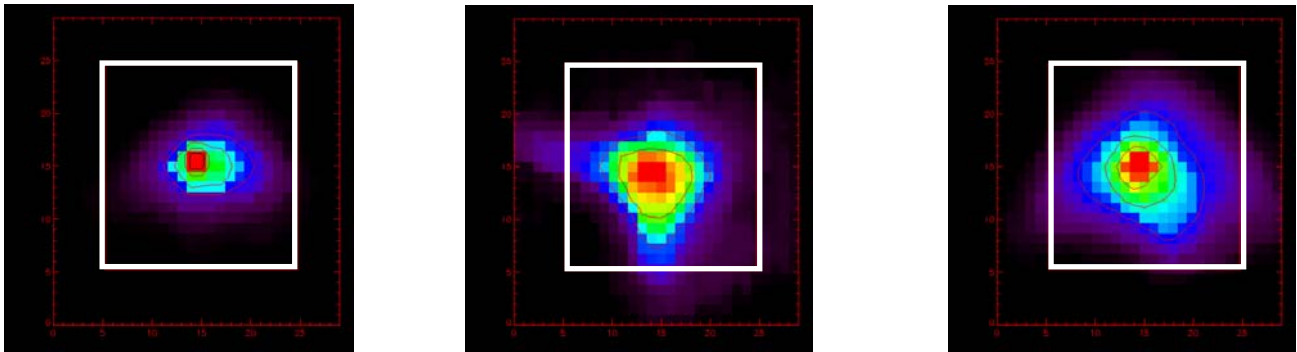


Figure 87 : PSF at 577 nm for the slice n°21 (left), at 436 nm for the slice n°3 (middle) and 823 nm for the slice n°38 (left)

On the central slice, the PSF is axial symmetrical and on the extremity slices, the PSFs are enlarged. The same tendency is observed on the slices located at the top and bottom of the slicer stack. At 577 nm, most ensquared energies of the PSFs are higher than the requirement (Figure 87). The average PSFs located on the slice n°2 have 72 % of ensquared energy. Approximately, the average of all PSFs at 577 nm is 86.36 %. At 436 and 823 nm, the conclusion is quite similar. The average values of ensquared energies are 85.8 % and 85.3 % at 436 nm and 823 nm respectively. Nevertheless, the results at 823 nm are less reliable due to an abnormal scattering in the lens L2 made of SF11. The melt used by the supplier was probably polluted. Since SF11 is a standard glass often used in optical instruments.

4.2.6. Measurement of the overall size of the exit pupil

This test allows to check the exit pupil size in the exit plane located at 6.2 m behind the pseudo-slit.

The detection unit is used with a collimator lens focusing at infinity. Each group of four exit pupils is observed simultaneously. The telescope focal plane in the illumination module is simulated by a rectangular aperture.

The acquisitions are made at 436 and 577 nm. In the exit plane, the requirements are given in Table 3. The length and width of the exit pupil is computed by our home software. The f-number is in concordance with the requirements at 436 and 577 nm along both axes in spite of a measurement uncertainty due to a moderate image quality of the exit pupils (blurred on the edges). At 823 nm, none measurement could be made because of the scattering of L2 (see previous section).

The errors on the tilts of the slicer were introduced in the Zemax file. In the exit plane, the results are the following:

- along x-axis, $f/D = 4.18$ compliant with the requirements
- along y-axis, $f/D = 7.98$ not compliant with the requirements but probably acceptable ($8.1 < f/D < 9$)

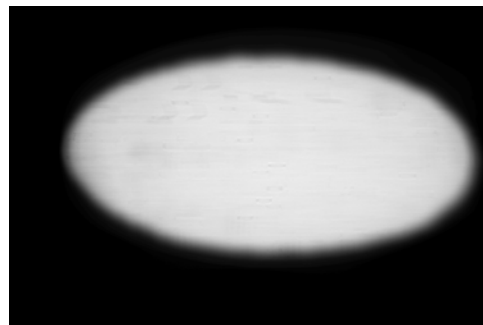


Figure 88 : Exit pupil at 577 nm for a group of 4 slices

In conclusion, these tests allowed to verify most of the system-level requirements in the slit and pupil planes. Only minor non-compliances have been found in particular on the slicer stack and these tests have been considered as globally successful.

5. CONCLUSION AND FUTURE DEVELOPMENTS

An original optical design associating an image slicer with mini-lenses arrays has been presented which answers to stringent requirements at an affordable cost. Moreover, a classical polishing approach and an ambitious assembling method by optical contact have been developed. This process provides a high positioning accuracy that could never be achieved with glued or mechanical solutions. The results and analysis of the tests of the advanced image slicer prototype for the MUSE instrument have been presented. The first measurement in the pupil plane allows to validate the angular tilts on the slicer. In spite of risky manufacturing with tight tolerances on the tilts, a high aspect ratio and a large slice number, the manufacture of the slicer is accurate. The second and third tests consist in the capture of the pseudo-slit. There is no crosstalk and an excellent alignment of the pseudo-slit. The geometric characteristics of each mini-slit are compliant with the magnification of the system. The fourth measure demonstrates the high image quality of the image slicer at all wavelengths. The last measurement gives an indication on the size of the exit pupil which is compliant with the requirement.

In summary, the results of the tests have proved that this glass prototype is in concordance with most of the requirements defined during the feasibility study. Possible improvements for the next design phase consist in:

- Decreasing cost with a large-scale production
- Improvement of the design (replacement of meniscus FLR with plano-convex FLR)
- Folding design in order to improve the compactness of the system

This work was carried out in the frame of an European Southern Observatory and an OPTICON JRA5 contract.

REFERENCES

1. Bacon et al., 2004, "The second-generation VLT instrument MUSE: science drivers and instrument design", Proc. SPIE, 5492, 1145
2. Hénault et al., 2004, "MUSE optomechanical design and performance", Proc. SPIE, 5492, 909
3. Hénault et al., 2003, "Slicing the Universe at affordable cost: The Quest for the MUSE Image Slicer", Proc. SPIE, 5249, 134
4. Content et al., 1997, "A new design for Integral Field Spectroscopy with 8-m Telescopes", Proc. SPIE, 2871, 1295
5. Laurent et al., 2003, "Optical Design, Fabrication and Testing a prototype of the NIRSpec IFU", Proc. SPIE, 5252, 443
6. Laurent et al., 2004, "Designing, manufacturing and testing of an advanced image slicer prototype for the James Webb Space Telescope", Proc. SPIE, 5494, 196
7. Bonneville and al., 2004, "Image slicer manufacturing: from space application to mass production", Proc. SPIE., 5494, 188
8. Laurent, "Image Slicer Prototype Test Plan", MUSE internal report n° MUSE-MEM-TEC-058